



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TESIS DOCTORAL

**EL PATRIMONIO HISTÓRICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT:
ANÁLISIS DE LAS APORTACIONES A LA INGENIERÍA CIVIL
MEDIANTE TÉCNICAS CAD/CAE**

**AGUSTÍN DE BETANCOURT'S HISTORICAL HERITAGE:
ANALYSIS OF THE CONTRIBUTIONS TO CIVIL ENGINEERING
THROUGH CAD/CAE TECHNIQUES**

AUTOR

D. EDUARDO DE LA MORENA DE LA FUENTE

Ingeniero Agrónomo
Universidad Politécnica de Madrid

DIRECTOR

Dr. D. JOSÉ IGNACIO ROJAS SOLA

Dr. Ingeniero Industrial
Catedrático de Universidad
Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería
Universidad de Jaén

PROGRAMA DE DOCTORADO

**INGENIERÍA AGRARIA, ALIMENTARIA, FORESTAL Y
DE DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE**

Presentada para la obtención del Título de
DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

MAYO DE 2018

TITULO: *EL PATRIMONIO HISTÓRICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT:
ANÁLISIS DE LAS APORTACIONES A LA INGENIERÍA CIVIL
MEDIANTE TÉCNICAS CAD/CAE*

AUTOR: *Eduardo de la Morena de la Fuente*

© Edita: UCOPress. 2018
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es

INDICE GENERAL

Página

INFORME Y AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR	9
AGRADECIMIENTOS	13
RESUMEN	15
ABSTRACT	17
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1. Introducción. Entorno de la investigación	21
1.2. Breve reseña de Agustín de Betancourt y Molina	21
1.3. Su obra científica y técnica	32
1.4. Aportaciones a la ingeniería civil	34
1.5. Línea de investigación	35
1.6. Objetivos de la tesis doctoral	35
2. MATERIAL Y MÉTODOS	37
2.1. Introducción	39
2.2. Diseño Asistido por Ordenador	39
2.2.1. Introducción	39
2.2.2. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor Professional 2016	42
2.2.2.1. Trabajo sobre la planimetría original y estudio de la memoria	42
2.2.2.2. Modelado 3D de las piezas y ensamblaje del conjunto	43
2.2.2.3. Creación de planos de detalle y de conjunto	51
2.2.2.4. Creación de perspectivas estalladas	58
2.2.3. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor Studio 2016	61
2.2.3.1. Creación de una imagen renderizada	61
2.2.3.2. Creación de una animación	64
2.3. Fabricación Aditiva (Impresión 3D)	68
2.3.1. Introducción	68
2.3.2. Impresoras y materiales utilizados	69
2.3.3. Proceso de impresión	71
2.3.3.1. Preprocesado de piezas y ensamblajes	71
2.3.3.2. Transformación de elementos a formato STL	71

2.3.3.3. <i>Dimensionado y posicionamiento</i>	72
2.3.3.4. <i>Acabado de piezas</i>	78
2.3.3.5. <i>Montaje o ensamblaje final</i>	78
2.4. Ingeniería Asistida por Ordenador	79
2.4.1. <i>Introducción</i>	79
2.4.2. <i>Entorno de trabajo en Autodesk Inventor Professional 2016</i>	79
2.4.2.1. <i>Preprocesado</i>	81
2.4.2.2. <i>Asignación de materiales</i>	81
2.4.2.3. <i>Condiciones de contorno</i>	83
2.4.2.4. <i>Fuerzas aplicadas</i>	84
2.4.2.5. <i>Discretización o mallado</i>	87
2.4.2.6. <i>Resultados</i>	89
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
3.1. Introducción	97
3.2. Máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos	97
3.2.1. <i>Introducción</i>	97
3.2.2. <i>Diseño Asistido por Ordenador</i>	97
3.2.2.1. <i>Funcionamiento</i>	100
3.2.2.2. <i>Modelado de la estructura bastidor</i>	101
3.2.2.3. <i>Modelado del mecanismo rotor</i>	102
3.2.2.4. <i>Modelado del sistema regulador de llenado de las artesis</i>	103
3.2.2.5. <i>Ensamblaje final</i>	106
3.2.3. <i>Ingeniería Asistida por Ordenador</i>	107
3.2.3.1. <i>Preprocesado</i>	107
3.2.3.2. <i>Asignación de materiales</i>	109
3.2.3.3. <i>Condiciones de contorno</i>	109
3.2.3.4. <i>Fuerzas aplicadas</i>	111
3.2.3.5. <i>Discretización o mallado</i>	114
3.2.3.6. <i>Resultados y discusión</i>	114
3.2.3.7. <i>Conclusiones</i>	117
3.2.4. <i>Impresión 3D</i>	118
3.3. Máquina para cortar cañas y otras plantas en canales y ríos navegables	121
3.3.1. <i>Introducción</i>	121
3.3.2. <i>Diseño Asistido por Ordenador</i>	121
3.4.2.1. <i>Funcionamiento</i>	125

3.4.2.2. Modelado de la embarcación	126
3.4.2.3. Modelado del eje vertical pivotante	127
3.4.2.4. Modelado del sistema de corte	129
3.4.2.4.1. Mecanismo de corte para el cabezal de cuchilla doble	129
3.4.2.4.2. Mecanismo de corte para el cabezal de cuchilla simple	130
3.4.2.5. Ensamblaje final	131
3.3.3. Ingeniería Asistida por Ordenador	133
3.3.3.1. Preprocesado	133
3.3.3.2. Asignación de materiales	134
3.3.3.3. Condiciones de contorno	134
3.3.3.4. Fuerzas aplicadas	136
3.3.3.5. Discretización o mallado	138
3.3.3.6. Resultados y discusión	139
3.3.3.7. Conclusiones	142
3.3.4. Impresión 3D	143
3.4. Molino de accionamiento hidráulico para la molienda del sílex	147
3.4.1. Introducción	147
3.4.2. Diseño Asistido por Ordenador	147
3.4.2.1. Funcionamiento	150
3.4.2.2. Modelado de la estructura impulsora (rueda hidráulica y árbol horizontal)	150
3.4.2.3. Modelado de la estructura de molienda (árbol vertical y sistema molienda)	154
3.4.2.4. Modelado de la fábrica de ladrillo	157
3.4.2.5. Ensamblaje final	158
3.4.3. Ingeniería Asistida por Ordenador	160
3.4.3.1. Preprocesado	160
3.4.3.2. Asignación de materiales	161
3.4.3.3. Condiciones de contorno	161
3.4.3.4. Fuerzas aplicadas	162
3.4.3.5. Discretización o mallado	165
3.4.3.6. Resultados y discusión	167
3.4.3.7. Conclusiones	170
3.4.4. Impresión 3D	170
3.5. Esclusa de émbolo buzo	175
3.5.1. Introducción	175
3.5.2. Diseño Asistido por Ordenador	179
3.5.2.1. Funcionamiento	180

3.5.2.2. Modelado del canal y la fábrica de ladrillo	182
3.5.2.3. Modelado de las compuertas superior e inferior	184
3.5.2.4. Modelado de los engranajes y la viga puente	185
3.5.2.5. Modelado del sistema contrapeso	187
3.5.2.6. Modelado del sistema intermedio entre contrapeso y buzo	190
3.5.2.7. Modelado del buzo	191
3.5.2.8. Ensamblaje final	193
3.5.3. Ingeniería Asistida por Ordenador	195
3.5.3.1. Preprocesado	195
3.5.3.2. Asignación de materiales	196
3.5.3.3. Condiciones de contorno	196
3.5.3.4. Fuerzas aplicadas	198
3.5.3.5. Discretización o mallado	199
3.5.3.6. Resultados y discusión	201
3.5.3.7. Conclusiones	206
3.5.4. Impresión 3D	207
3.6. Draga mecánica del puerto de Kronstadt	211
3.6.1. Introducción	211
3.6.2. Diseño Asistido por Ordenador	212
3.6.2.1. Funcionamiento	216
3.6.2.2. Modelado del barco y elementos impulsores	219
3.6.2.3. Modelado de la estructura balancines-cigüeñal	220
3.6.2.4. Modelado de la estructura de la draga	223
3.6.2.5. Modelado del sistema de cuchara	229
3.6.2.6. Modelado del sistema de maniobra y elevación	234
3.6.2.7. Ensamblaje final	237
3.6.3. Ingeniería Asistida por Ordenador	245
3.6.3.1. Preprocesado	245
3.6.3.2. Asignación de materiales	246
3.6.3.3. Condiciones de contorno	246
3.6.3.4. Fuerzas aplicadas	248
3.6.3.5. Discretización o mallado	251
3.6.3.6. Resultados y discusión	253
3.6.3.7. Conclusiones	259
3.6.4. Impresión 3D	260

4. CONCLUSIONES	265
4.1. Introducción	267
4.2. Conclusiones generales	267
4.3. Conclusiones particulares	269
4.4. Desarrollos futuros	271
 BIBLIOGRAFÍA	 273
ÍNDICE DE FIGURAS	281
 ANEXOS	 289
ANEXO 1: Publicaciones derivadas de la tesis doctoral	291
ANEXO 2: Planimetría de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanos	293
ANEXO 3: Planimetría de la máquina para cortar cañas y otras plantas acuáticas	295
ANEXO 4: Planimetría del molino hidráulico para la molienda del sílex	297
ANEXO 5: Planimetría de la esclusa de émbolo buzo	301
ANEXO 6: Planimetría de la draga mecánica del puerto de Kronstadt	303



TÍTULO DE LA TESIS:

EL PATRIMONIO HISTÓRICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT: ANÁLISIS DE LAS APORTACIONES A LA INGENIERÍA CIVIL MEDIANTE TÉCNICAS CAD/CAE

DOCTORANDO:

EDUARDO DE LA MORENA DE LA FUENTE

INFORME RAZONADO DEL DIRECTOR DE LA TESIS

(Se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma)

D. JOSÉ IGNACIO ROJAS SOLA, Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Jaén

INFORMA: que la Tesis Doctoral titulada *"El patrimonio histórico de Agustín de Betancourt: Análisis de las aportaciones a la ingeniería civil mediante técnicas CAD/CAE"*, de la cual es autor **D. Eduardo de la Morena de la Fuente**, ha sido realizada bajo mi dirección y cumple las condiciones exigidas por la legislación vigente para optar al **Título de Doctor por la Universidad de Córdoba**.

La Tesis Doctoral es el resultado final de un gran esfuerzo realizado por su autor a lo largo de estos últimos años, habiendo obtenido en concurrence competitiva de una de las dos prestigiosas becas de doctorado de la Fundación Juanelo Turriano sobre estudios de Historia de la Ciencia y de la Técnica en la convocatoria 2016/2017, mérito que destaca por sí sólo las cualidades y aptitudes del doctorando para la investigación.

Su trabajo se ha desarrollado en la línea de investigación de *Diseño en la Ingeniería y Arquitectura* en el seno del Programa de Doctorado de Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y de Desarrollo Rural Sostenible de la Universidad de Córdoba según RD99/2011, presentando una titulación de acceso al mismo de Ingeniero Agrónomo por la Universidad Politécnica de Madrid.

La Tesis Doctoral ha supuesto un ambicioso trabajo de investigación, habiéndose desarrollado en el seno de un Proyecto de Investigación de Excelencia en el marco del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento del Plan Estatal de I+D+I 2013-2016, concedido por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España a la Universidad de Jaén, y titulado *"El patrimonio histórico de Agustín de Betancourt: estudio integral de las aportaciones a la ingeniería civil desde la perspectiva de la ingeniería gráfica para su puesta en valor y difusión"* con referencia HAR2015-63503-P y desarrollado en el período comprendido del 1 de enero de 2016 al 31 de diciembre de 2018, siendo el Investigador Principal el Director de la Tesis, Prof. Dr. José Ignacio Rojas Sola.

La Tesis Doctoral presenta novedosos aspectos relativos a las principales invenciones históricas de Agustín de Betancourt y Molina en lo relativo a la ingeniería civil, abarcando tres enfoques:

histórico, gráfico y técnico. Asimismo, ha conseguido una amplia difusión de los resultados de la investigación mediante publicaciones científicas.

Para ello, se ha realizado una extensa revisión bibliográfica y se ha buceado en los fondos disponibles en la web del Proyecto Digital Betancourt organizada por la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, y a cuyo antiguo Director D. Sergio Toledo Prats, agradezco su amabilidad por la autorización dada para utilizar los mismos, e incorporar sus imágenes a las diversas publicaciones que han visto la luz. Sin duda, se trata de la principal fuente de información utilizada en el desarrollo de la tesis doctoral.

En particular, las invenciones históricas relacionadas con la ingeniería civil analizadas son cinco: la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos (1789), la máquina cortadora de cañas y otras plantas acuáticas en canales y ríos navegables (1795), el molino de accionamiento hidráulico para la molienda del sílex (1796), la esclusa de émbolo buzo (1801), y la draga mecánica del puerto de Kronstadt (1810).

En todas y cada una de ellas, se ha realizado su modelado 3D fidedigno mediante técnicas CAD (*Computer-Aided Design*), en base a la escasa información aportada en los expedientes de dichas invenciones históricas, obteniendo su documentación geométrica mediante diversos planos de conjunto, de detalle y perspectivas estalladas o de montaje. Para ello, ha sido necesario establecer una serie de restricciones geométricas, dimensionales y de movimiento en orden a garantizar su correcto funcionamiento. Asimismo, una vez obtenido el modelo 3D se ha realizado un exhaustivo estudio de ingeniería mediante técnicas CAE (*Computer-Aided Engineering*), concretamente un análisis estático, donde se han obtenido la distribución de las tensiones de von Mises, los desplazamientos y deformaciones, así como el coeficiente de seguridad, para determinar si estaban bien dimensionadas y si funcionaban dentro de los límites de seguridad. Todas estas tareas se han realizado gracias al concurso del software Autodesk Inventor Professional.

Asimismo, la calidad de la investigación desarrollada ha sido refrendada por las numerosas publicaciones científicas realizadas en revistas internacionales con factor de impacto indexadas en los listados del Journal Citation Reports (JCR) o Emerging Sources Citation Index que realiza Clarivate Analytics o en Scopus de Elsevier, un capítulo de libro en editorial internacional (Nova Science Publishers), y sendas comunicaciones a Congresos Internacionales. Son las siguientes:

1. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2019). Agustín de Betancourt's plunger lock: Analysis of its construction through computer-aided engineering. *Informes de la Construcción* 71(553) (aceptado para publicación). Doi: 10.3989/id.61041. (*JCR Science Edition*). Doi: 10.3989/id.61041.
2. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2018). La máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos de Agustín de Betancourt y Molina: análisis de su construcción mediante ingeniería asistida por ordenador. *Informes de la Construcción* 70(549), e236. 2018. (*JCR Science Edition*). Doi: 10.3989/id.54738.
3. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2018). El molino para la molienda de sílex de Agustín de Betancourt y Molina: Análisis mediante ingeniería asistida por ordenador. *Dyna* 93(2), 165-169. (*JCR Science Edition*). Doi: 10.6036/8218.
4. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2018). Geometric modeling of the machine for cutting cane and other aquatic plants in navigable waterways by Agustín de Betancourt y Molina. *Technologies* 6(1), article 23. (*Web of Science – Emerging Sources Citation Index*). Doi: 10.3390/technologies6010023.

5. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena de la Fuente, E. (2018). Digital 3D reconstruction of Betancourt's historical heritage: the dredging machine in the Port of Kronstadt. *Virtual Archaeology Review* 9(18), 44-56. (Web of Science – Emerging Sources Citation Index). Doi: 10.4995/var.2018.7946.
6. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2017). *The machine for cutting cane and other aquatic plants in navigable waterways by Agustín de Betancourt y Molina: analysis by computer-aided engineering techniques with Autodesk Inventor Professional*. En: MECHANICAL SYSTEMS: RESEARCH, APPLICATIONS AND TECHNOLOGY, pp. 53-71. Editor: Seifedine Kadry. Nova Science Publishers (New York, EE.UU). ISBN: 978-1-53612-370-8.
7. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2017). Agustín de Betancourt's wind machine for draining marshy ground: Approach to its geometric modeling with Autodesk Inventor Professional. *Technologies* 5(1), artículo 2. (Web of Science – Emerging Sources Citation Index). Doi: 10.3390/technologies5010002.
8. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2017). Agustín de Betancourt's plunger lock: Approach to its geometric modeling with Autodesk Inventor Professional. *International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing*. Catania (Sicilia, Italia), 14 a 16 de septiembre de 2016. Páginas: 757-765. ISBN: 978-3-319-45780-2. Doi: 10.1007/978-3-319-45781-9_76.
9. Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. (2016). El molino para la molienda del sílex de Agustín de Betancourt y Molina: Aproximación a su modelado geométrico con Autodesk Inventor Professional. *I Congreso Internacional de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública*. Huelva, 26 a 28 de octubre de 2016. (Actas en CD). Páginas: 353-361. ISBN: 978-84-617-5659-9.

Por todo ello, en dicha Tesis Doctoral puedo subrayar la originalidad del planteamiento, el rigor de su metodología o planteamiento y el mérito científico-técnico de sus resultados, cubriendo sobradamente todos los requisitos necesarios para que su autor alcance el grado de Doctor por la Universidad de Córdoba. Como consecuencia, **SE AUTORIZA** la presentación esta tesis doctoral ante la Comisión Académica del Programa de Doctorado de la Universidad de Córdoba, quedando firmado este informe a siete de mayo de 2018.

Firma del Director

ROJAS
SOLA JOSE
IGNACIO -
259887965

Firmado digitalmente por
ROJAS SOLA JOSE IGNACIO -
259887965
Nombre de reconocimiento
(DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-259887
965, givenName=JOSE
IGNACIO, sn=ROJAS SOLA,
cn=ROJAS SOLA JOSE
IGNACIO - 259887965
Fecha: 2018.05.07 20:14:22
+02'00'

JOSÉ IGNACIO ROJAS SOLA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis doctoral, el Catedrático Prof. Dr. D. José Ignacio Rojas Sola por la tutela en mi formación, el inestimable apoyo, su enérgica y constante ayuda durante estos años de duro esfuerzo, así como por toda su dedicación, disponibilidad y motivación que siempre me ha demostrado. Él y yo sabemos que sin su paciente soporte esta tesis doctoral no hubiera sido posible.

Especialmente, quisiera agradecer a la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, y en particular, a su antiguo Director D. Sergio Toledo Prats, la autorización que le dio a mi director, para disponer del material disponible en su website del Proyecto Digital Betancourt, en el seno del Proyecto de Investigación titulado *“El patrimonio histórico de Agustín de Betancourt: estudio integral de las aportaciones a la ingeniería civil desde la ingeniería gráfica para su puesta en valor y difusión”* (HAR2015-63503-P), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación del Conocimiento, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Me gustaría mencionar también a muchas personas que me han ayudado con su trabajo, con sus consejos y con su amistad: Miguel, José, Antonio, Joaquín, Paco, Juan Manuel, Vianney, Álvaro... son muchos más nombres y me faltaría espacio para explicar los motivos.

También, quisiera agradecer especialmente a mis padres todo el apoyo que me han prestado, pues su ejemplo y su animante cariño, me han sostenido durante este largo camino.

Finalmente, expresar unas sinceras palabras de agradecimiento a la Fundación Juanelo Turriano por la concesión en la convocatoria 2016/2017 de una de sus prestigiosas becas predoctorales, que me ha permitido obtener los recursos necesarios para afrontar esta investigación.



FUNDACIÓN
JUANELO
TURRIANO

RESUMEN

La presente tesis doctoral desarrolla una innovadora y original investigación sobre algunas de las aportaciones más importantes de Agustín de Betancourt y Molina relacionadas con la ingeniería civil desde el punto de vista de la ingeniería gráfica.

Su contenido se estructura en los siguientes capítulos:

El **Capítulo 1** expone una aproximación a la figura y obra del genial ingeniero español. Se hace un recorrido somero por su biografía incidiendo en su formación, en las personas que influyeron en ella y en los principales trabajos que llevó a cabo. Asimismo, se ha realizado un especial esfuerzo en ordenar cronológicamente su obra científica y técnica, resaltando aquellas contribuciones cuyo aporte a la ingeniería civil ha sido mayor.

El **Capítulo 2** se centra en exponer los materiales y el marco teórico de la metodología aplicada para conseguir los objetivos de la tesis doctoral. En primer lugar, se ha detallado el proceso de diseño asistido por ordenador de cualquier invención ligada al patrimonio histórico técnico desde el material de partida hasta modelo CAD 3D, utilizando para ello, el software Autodesk Inventor Professional 2016 y su herramienta de animación Autodesk Inventor Studio. En segundo lugar, se ha descrito el proceso para la impresión 3D de los modelos estudiados utilizando técnicas de fabricación aditiva. Y en tercer lugar, se ha descrito el proceso de análisis de ingeniería asistida por ordenador (CAE) en orden a realizar el análisis estático de cada una de las invenciones históricas analizadas, utilizando el método de elementos finitos.

El **Capítulo 3** presenta los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el capítulo 2 sobre las 5 aportaciones más notables de Agustín de Betancourt y Molina, relacionadas con la ingeniería civil: la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos, la máquina para cortar las cañas y otras plantas acuáticas en canales y ríos navegables, el molino de accionamiento hidráulico para la molienda del sílex, la esclusa émbolo buzo y la draga mecánica del puerto de Kronstadt. El estudio independiente de cada uno de las invenciones, ha posibilitado obtener un modelo 3D ensamblado y funcional, así como una impresión 3D y un completo estudio de tensiones de von Mises, desplazamientos, deformaciones y coeficiente de seguridad. Así pues, a partir de estos resultados se han obtenido unas conclusiones desde el punto de vista de la ingeniería mecánica y de la ingeniería constructiva.

Por último, en el **Capítulo 4** se exponen las conclusiones generales, particulares y posibles desarrollos futuros que se desprenden a partir de la presente tesis doctoral. Las conclusiones generales apuntan a la relevancia del trabajo de Agustín de Betancourt y Molina en la ingeniería de la época y en la ingeniería actual, así también sobre la conveniencia y limitaciones de la metodología seguida para el estudio de las invenciones históricas. Por su parte, las conclusiones particulares hacen hincapié en las aportaciones específicas a la ingeniería que hacen cada uno de los ingenios, y finalmente, se proponen tres líneas de investigación para estudios ulteriores en el campo del patrimonio histórico técnico.

Palabras clave: Agustín de Betancourt y Molina, Ingeniería Gráfica, Historia de la Tecnología, Diseño Asistido por Ordenador, Ingeniería Asistida por Ordenador, Patrimonio Histórico, Arqueología Industrial.

ABSTRACT

The present doctoral thesis develops an innovating and original research about some of the most important contributions of Agustín de Betancourt y Molina related to civil engineering from the point of view of engineering graphics. Its content is divided into the following chapters:

Chapter 1 shows an approach to the person and work of the outstanding Spanish engineer. There is a short journey through his biography, focusing on his education, on the people who influenced him and on the main works he carried out. Also, a special effort has been made to order its scientific and technical work chronologically, underlining those whose contribution to civil engineering has been important.

Chapter 2 focuses on exposing the materials and the theoretical framework of the methodology applied to achieve the objectives of the doctoral thesis. Firstly, the process of computer-aided design of any invention linked to the technical historical heritage, from the starting material to the 3D CAD model has been detailed, using Autodesk Inventor Professional 2016 software and Autodesk Inventor Studio animation tool. Secondly, the process for 3D printing of the models studied using additive manufacturing techniques has been described. And third, the process of computer-aided engineering (CAE) analysis has been described in order to perform the static analysis of each of the historical inventions, using the finite element method.

Chapter 3 presents the results obtained by applying the methodology described in chapter 2 on the five most notable contributions of Agustín de Betancourt y Molina related to civil engineering: the wind machine for draining marshy ground, the machine for cutting cane and other aquatic plants in navigable waterways, the hydraulic drive mill for flint milling, the plunger lock and the mechanical dredger in the Port of Kronstadt. The independent study of each invention has made possible to obtain an assembled and functional 3D model, as well as 3D printing and a complete study of von Mises stresses, displacements, deformations, and safety coefficient. Thus, from these results some conclusions have been obtained from the point of view of mechanical and construction engineering.

Finally, **Chapter 4** presents the general and particular conclusions and possible future works that arise from the present doctoral thesis. The general conclusions point to the relevance of the work of Agustín de Betancourt y Molina in the engineering of the time and in the current engineering, as well as the convenience and limitations of the methodology followed in the study of the historical inventions. On the other hand, the particular conclusions emphasize the specific contributions to engineering made by each one of the inventions, and at last, three lines of research are proposed for additional studies in the field of technical historical heritage.

Keywords: Agustín de Betancourt y Molina, Engineering Graphics, History of Technology, Computer-Aided Design, Computer-Aided Engineering, Historical Heritage, Industrial Archaeology.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El estudio de personajes relevantes a lo largo de la historia ha sido clave en diferentes sectores, ya que han alumbrado hallazgos importantes, y por tanto, el análisis detallado de las aportaciones históricas, supone un avance sobresaliente en el conocimiento de la historia de la técnica.

Esta rama del saber es importante ya que la ingeniería debe asumir su propia evolución como una disciplina. Así pues, esta tesis doctoral completamente **original e innovadora**, busca la puesta en valor de la obra del genial ingeniero español, creador de la 1ª Escuela de Ingenieros de Caminos de España, y para ello, enfoca la investigación desde el punto de vista de la ingeniería gráfica.

La figura de Agustín de Betancourt y Molina ha sido, y sigue siendo, ampliamente analizada desde diversas disciplinas, viendo la luz muchas publicaciones relacionadas desde diversos puntos de vista (históricos, humanísticos, biográficos,...), pero se echa en falta la existencia reconocida de estudios técnicos más profundos, y más concretamente, desde la óptica de la ingeniería gráfica para la puesta en valor y difusión de sus aportaciones relacionadas con la ingeniería civil. Esta tesis doctoral busca precisamente, completar este hueco existente en el panorama internacional desde dicho punto de vista, siendo analizadas mediante técnicas de ingeniería y simulación asistidas por ordenador (CAE, del inglés *Computer-Aided Engineering*).

Dada la importancia de la investigación, se solicitó un Proyecto de Investigación en la convocatoria Proyectos de I+D 2015, dentro del Programa Estatal de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación del Conocimiento del Ministerio de Economía y Competitividad, que fue concedido con calificación A (Excelente), con una gran diversidad de objetivos, lo que supone sin duda, un reconocimiento a los indicios de calidad presentados en su memoria científico-técnica.

Así pues, la presente tesis doctoral, se desarrolla en el seno del citado Proyecto de Investigación titulado *“El patrimonio histórico de Agustín de Betancourt y Molina: estudio integral de las aportaciones a la ingeniería civil desde la ingeniería gráfica para su puesta en valor y difusión”* (HAR2015-63503-P), en el marco del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación del Conocimiento, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, cuyo período de realización abarca del 1 de enero de 2016 al 31 de diciembre de 2018, y cuyo investigador principal es el director de la tesis doctoral, el Catedrático Prof. Dr. D. José Ignacio Rojas Sola.

1.2. Breve reseña personal de Agustín de Betancourt y Molina

Agustín de Betancourt y Molina (1758-1824) fue sin lugar a dudas, uno de los protagonistas más importantes en los orígenes de la ingeniería, tanto en España como en Europa; una figura que se excedió a sí mismo, dejando un legado que determinó la formación de muchas generaciones de ingenieros (Figura 1.1). Nacido en la localidad tinerfeña del Puerto de la Cruz, fue hijo de D. Agustín de Betancourt y Castro, teniente coronel de infantería y caballero de la orden de Calatrava y de doña Leonor de Molina y Briones, hija de los marqueses de Villafuerte (Padrón Acosta, 1958).

La familia de once hermanos dejó una profunda huella en su formación, participando del ambiente ilustrado que había en la casa, y que desarrollaron principalmente su hermano José y su hermana María. A temprana edad, gracias a la educación recibida de sus padres, empezó a destacar por su espíritu inquieto, y en 1778, con 20 años, inventó con ayuda de su hermana, una máquina epicilíndrica para el hilado de la seda. A parte de su formación en el colegio de los

Dominicos de la Orotava, participaba junto a su padre en la ilustrada Tertulia de Nava (en casa de Tomás de Nava y Grimón), y más adelante, en la de la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife (Martín Medina, 2006).



Figura 1.1. Retrato de Agustín de Betancourt y Molina por Francisco de Goya.
(Fuente: Galería de personajes ilustres de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid)

Asimismo, como el resto de varones de la familia, Agustín se alistó en el regimiento de milicias provinciales de la Orotava en julio de 1777 ingresando como cadete. Un año después ascendería a subteniente y en mayo de 1778 a teniente (Arencibia de Torres, 1990). En octubre de 1778, abandonó su isla natal para no regresar nunca más, comenzando así su formación técnica en Madrid, primero en el Colegio de San Isidro y más adelante en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Su paso por estos centros formativos fueron determinantes para experimentar hasta qué punto, la formación de los arquitectos e ingenieros de la época, era insuficiente para llevar a cabo la labor que a ellos se les encomendaba (Betancourt y Castro, 1840).

En estos centros Agustín destacó desde el primer momento y, gracias a sus buenas relaciones, pronto estableció contacto con don José Moñino, conde de Floridablanca. De esas reuniones Agustín de Betancourt obtuvo dos encargos de cierta importancia que sirvieron para demostrar su valía como ingeniero. El primero cronológicamente hablando, trató del informe que realizó sobre el Canal Imperial de Aragón tras la avería de una presa, con su paisano don Alonso de Nava y Grimón, marqués de Villanueva del Prado (Sáenz Ridruejo, 1978). El segundo, ya en solitario, fue la inspección que realizó a las minas de Almadén y que dieron como lugar a tres memorias: sobre el agua de las minas, sobre la maquinaria y sobre la fundición del mineral (Figura 1.2). La impresión que se llevó el conde de Floridablanca no pudo ser mejor. Todavía en 1783, tuvo otra oportunidad de exhibir su ingenio ante toda la corte reunida en el Escorial cuando hizo volar un globo aerostático (los hermanos Montgolfier lo habían realizado sólo unos meses antes en Francia). Así pues, el prestigio y la confianza hacia el canario por parte de la corte aumentaban con cada una de sus intervenciones (Utrilla Navarro, 1993).

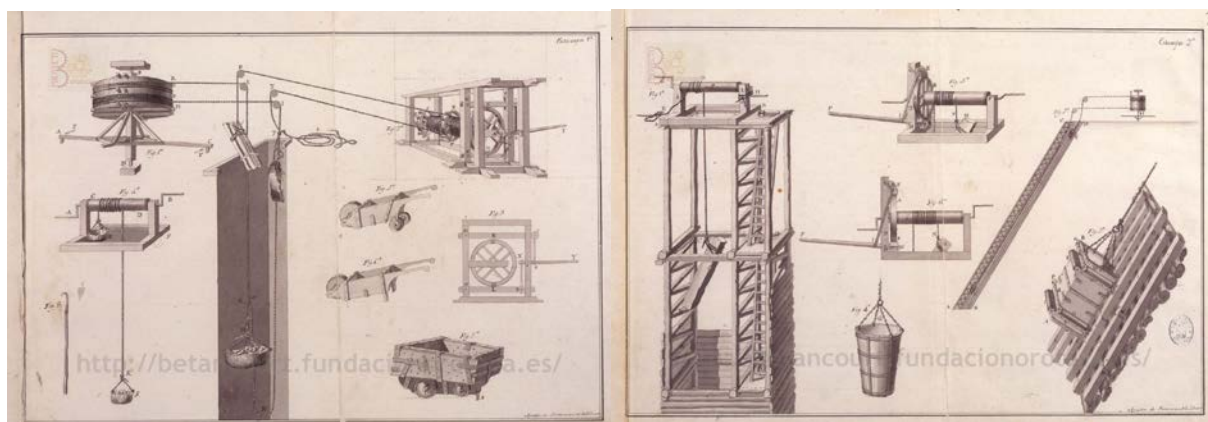


Figura 1.2. Detalles de la maquinaria empleada en las minas de Almadén (Betancourt y Molina, 1783).

En febrero de 1784, Floridablanca dio el visto bueno para que Agustín marchara a París para estudiar en la École des Ponts et Chaussées (Betancourt y Castro, 1840). Allí entró en contacto

con figuras de altísimo nivel como Gaspard Monge, Gaspard Prony o Jean Rodolphe Perronet, que en aquel momento era el director de la Escuela de Ingenieros e inspector general de Puentes y Calzadas. Se sabe que cultivó una profunda amistad con Perronet, cuya personalidad y memorias científicas marcaron al joven Betancourt (Proyecto Digital Betancourt). Durante el curso, Betancourt escribió una memoria sobre la obtención del betún a partir de la purificación del carbón, fruto de las observaciones hechas en los hornos del *Jardin des Plantes* de París, donde se trabajaba con hulla, y que cedió a la Sociedad de Amigos del País de Asturias para su aprovechamiento. Terminado el curso se reunió con Floridablanca para hacerle entender las grandes diferencias que encontraba en la formación de los ingenieros españoles y franceses, proponiéndole la creación de una Escuela de Puentes y Calzadas usando de modelo de la *École des Ponts et Chaussées* francesa. Ese verano también trabajó en el estudio de la seda con el químico francés Luis Proust que residía en el Real Seminario de Vergara (Guipúzcoa) (Betancourt y Castro, 1840). Como resultado de las investigaciones, Proust publicó en 1791 un artículo en la revista *Anales del Real Laboratorio de Química de Segovia* titulado *Experiencias sobre el descruar la seda sin xabon* en el que menciona los experimentos efectuados con Betancourt (Proust, 1791).

En septiembre de 1785 volvió a París con su hermano José, donde regresaba con un doble encargo: tutelar el grupo de pensionados españoles, y conseguir planos y documentos para el Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro. Una de las que envió a Madrid fue un telar de su propia invención para la confección de cintas anchas de rasolino y tafetán. Esta segunda estancia parisina, de tres años de duración, serviría también para viajar con su hermano por diferentes lugares de Francia, conociendo factorías y puertos de los que darían noticia. Durante este período hizo amistad con el relojero suizo Abraham Louis de Breguet, amistad que duraría toda la vida (García Diego, 1975). En 1787, estando en París, Betancourt recibió el nombramiento de director del Real Gabinete de Máquinas, aunque no tomó posesión del mismo hasta 1792.

La segunda estancia parisina tuvo un pequeño paréntesis. El ingeniero español, interesado por las noticias sobre la máquina de vapor, consiguió una entrevista con sus inventores James Watt y Matthew Boulton para que le hablaran de su patente. Este encuentro tuvo lugar en noviembre de 1788. Su estancia duró un mes y Betancourt aprovechó su viaje de manera inesperada. Los inventores ingleses le recibieron en Albion Mills, la empresa londinense de Boulton donde se construía la máquina, y le hablaron del avance de su máquina de vapor de doble efecto, pero se negaron a enseñarle el artificio. Betancourt se despidió cortésmente de sus anfitriones pero volvió dando un rodeo visualizando la máquina en parte. No necesitó más que unos momentos para comprender su funcionamiento. Así pues, antes de finales de año, presentó a la Academia de Ciencias de París una máquina de vapor de doble efecto basada en la diseñada por Watt. Los ingleses acusaron a Betancourt con posterioridad de espionaje industrial, pero Betancourt nunca se atribuyó el invento de la misma. De todos modos, las diferencias entre ambas son notables ya que Betancourt tuvo que suplir con su ingenio lo que no pudieron ver sus ojos (Figura 1.3) (García Diego, 1988; Gouzévitch y Gouzévitch, 2002).

De Inglaterra no sólo se trajo la máquina de vapor, también tomó nota de un telar que mandaría reproducir en Francia y de los sistemas hidráulicos usados por los ingleses (García Diego, 1988). El curso en l'École resultó un tanto convulso debido a la revolución francesa que le sorprendió en su mismo epicentro. El mismo año de la revolución inventó una máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos enviando su memoria al Real Gabinete de Máquinas (Betancourt y Molina, 1789). Se ocupó de recabar una colección de instrumentos físicos para la expedición de Malaespina y contactó con el mexicano José María de Lanz con el que empezó a escribir un tratado sobre las máquinas (López-Cajún *et al.*, 2004). Ya en 1790 fabricó con la colaboración de los hermanos Périer un molino harinero accionado por una máquina de vapor. Esta fue la primera máquina de vapor que funcionó fuera de Inglaterra (Moreno Domínguez, 2014). Fruto de sus estudios sobre la máquina de vapor, escribió una memoria sobre la fuerza expansiva del vapor de agua, que obtuvo el visto bueno de la Academia en septiembre de ese año (Martín

Medina, 2008). Las tensiones sociales en París fueron subiendo en 1790 a raíz de la aprobación de la constitución civil del clero. Floridablanca escribió en febrero de 1791, ordenando el regreso de todos los pensionados españoles. En junio la familia real francesa, con motivo de las decisiones adoptadas por la Asamblea Nacional, intentó huir (Fuga de Varennes) pero fue inmediatamente apresada y detenida.

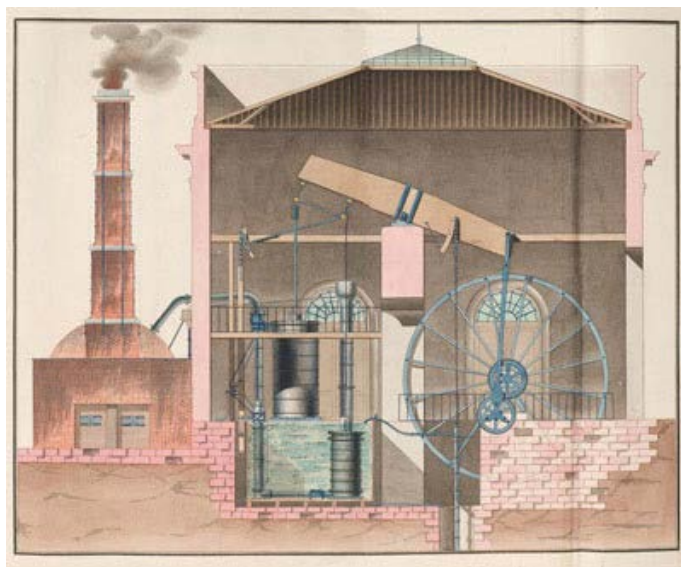


Figura 1.3. Máquina de vapor de doble efecto (Betancourt y Molina, 1789).

Los últimos meses en París fueron, pese a la revuelta social, muy fructíferos. Envió a España numerosos inventos para el Real Gabinete de Máquinas, y escribió con José Luis López de Peñalver una memoria sobre los medios para facilitar el comercio interior en la que se hablaba de los caminos y canales como eje estratégico de la dinamización del comercio, así como de la necesidad de crear una escuela donde se formasen los futuros ingenieros. Antes de abandonar Francia, todavía tuvo tiempo de tomar notas para la descripción de una fábrica de cañones de la marina francesa en Yndrid. La memoria de este trabajo también la terminó antes de partir, el 28 de julio de 1791 (Martín Medina, 2006).

Betancourt volvió a España haciendo escala en Lyon donde examinó las manufacturas que allí se realizaban. Después hizo escala en Barcelona y en Valencia examinando puertos y caminos. Al llegar a Madrid, fue ascendido a capitán gracias al meritorio trabajo desarrollado a favor de la Corona, pero se guardó mucho de mencionar que se había casado sin permiso con la inglesa Ana de Jourdan en 1790 (Sáenz Ridruejo, 2016).

En España se dedicó en cuerpo y alma a poner en funcionamiento el Real Gabinete de Máquinas que abriría al público en el Palacio del Buen Retiro en abril de 1792. Su idea, bien conocida por Floridablanca, era aprovechar ese entorno para crear la primera escuela de ingenieros de Caminos y Canales de España. Pero en febrero, Floridablanca cayó en desgracia y fue detenido y confinado en Pamplona por las intrigas de don Pedro Pablo Abarca de Bolea, conde de Aranda. Éste, conocedor de la valía de Betancourt, siguió prestando apoyo a todas sus iniciativas y se planteó estudiar la creación de la Escuela siguiendo el modelo francés. En abril Betancourt publicó el catálogo de la colección de modelos, planos y manuscritos recogidos en su estancia en Francia. En verano trabajó en una comisión para la mejora de la enseñanza en el que se encontraba Francisco de Goya (que llegó a hacerle un retrato), y escribió un primer boceto sobre una máquina para limpiar los fondos de los puertos que sería el germen de su barco dragadora. En octubre fue nombrado director del Real Gabinete y se dispuso que su residencia estuviese en el mismo Palacio del Buen Retiro, pero el conde de Aranda presentó su renuncia en noviembre de ese año y Manuel Godoy pasó a ser el ministro plenipotenciario de Carlos IV. Este giro inesperado en la historia cambió por completo los planes iniciales del canario que chocó con el

carácter del valido. El proyecto de escuela desaparecería y el Real Gabinete de Máquinas quedaría reducido a un museo de maquetas (Rumeu de Armas, 1990). A su vez el Ministerio de Marina desechó la idea de la draga para los puertos de Cádiz o Cartagena.

Perdidas las ilusiones de los proyectos que traía entre manos Agustín envió a Ana de Jourdan a Inglaterra, y en cuanto pudo, solicitó una beca para proseguir estudios y conseguir nuevos materiales para el Gabinete en las Islas Británicas. Godoy concedió la pensión demandada y Peñalver quedó al frente del Real Gabinete mientras Betancourt residía fuera.

Desde octubre de 1793 a octubre de 1796 se estableció en Inglaterra, donde se llevó a Bartolomé Sureda que se reafirmó como un gran colaborador y espléndido dibujante. De este período se tienen pocas noticias más allá del premio que recibió en 1795 de parte de la *Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce* por la invención de una máquina para cortar hierba en ríos y canales (Figura 1.4) (Betancourt y Molina, 1795), que años después publicaría traducida al francés (Betancourt y Molina, 1800). Al año siguiente fue la *Royal Board of Agriculture* la que premió otros dos inventos, uno de ellos una máquina hidráulica para la molienda del sílex (Betancourt y Molina, 1796b). Asimismo, en una visita a Coalbrookdale conoció una esclusa de plano inclinado para elevar y bajar bateles para grandes desniveles de la que tomó importantes apuntes (Proyecto Digital Betancourt).

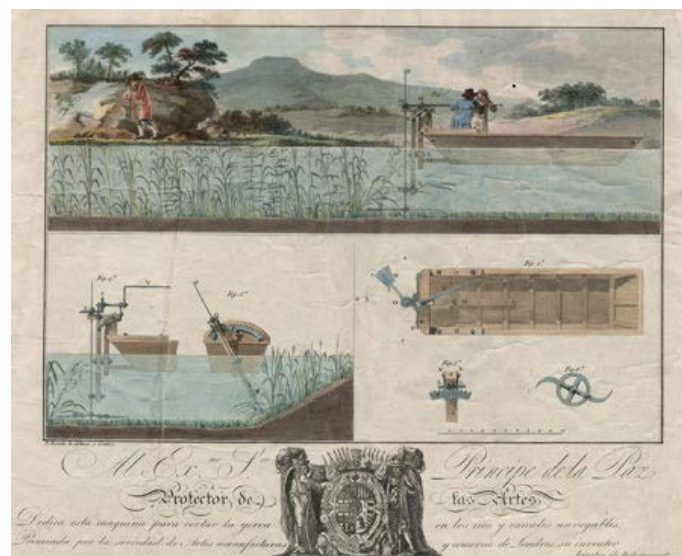


Figura 1.4. Máquina para cortar las cañas y otras plantas acuáticas (Betancourt y Molina, 1795).

En 1796 Joaquín Beltrán de Santa Cruz, conde de Mopox, y el gobernador de Cuba, Luis de las Casas, pidieron a Carlos IV montar una expedición a la bahía de Cochinos con vistas a crear allí una nueva ciudad desde donde se pudieran explotar mejor los recursos madereros de la isla. El proyecto contaba con la creación de varios canales, una red de caminos y la urbanización de la propia ciudad. Asimismo, la expedición contaba con el visto bueno de Godoy, y para ello se quiso contar tanto con Agustín de Betancourt como con Bartolomé Sureda y José María Lanz. El ingeniero canario aceptó el encargo y se comprometió a conseguir el instrumental necesario en Londres con el fin de equipar la expedición. La expedición debía partir en septiembre, pero desde agosto, las relaciones diplomáticas entre España e Inglaterra estaban rotas. Así pues, el material se retrasó, y su envío a España vía Francia resultó costoso. Por otra parte, la impaciencia del conde de Mopox acabó por enemistar completamente a Godoy con Betancourt ya que la expedición tuvo que retrasar su salida dos meses más, y finalmente Betancourt, Sureda y Lanz no tomaron parte en la misma. El barco fue apresado frente a las costas de Lanzarote por Nelson y la expedición llegó a Cuba sin el instrumental y con varios meses de retraso (Primo Medina y Pérámos Mendoza, 1988).

En octubre, Betancourt consiguió salir de Inglaterra pocos días antes de la declaración de guerra entre ambos países, y se detuvo un tiempo en Francia. Allí se reencontró con su amigo Breguet, con quien presentó al *Directorio* la memoria y los planos de un prototipo de telégrafo óptico. El inventor del mismo, Claude Chappe, veía peligrar el uso de su patente y consiguió que el expediente del prototipo fuera archivado de momento (García Diego, 1975). También en Francia, Betancourt y el empresario Pérrier, obtuvieron la patente para la explotación de la prensa hidráulica basada en la que meses antes había inventado Joseph Bramah, y que el canario había visto durante su segunda estancia en Inglaterra.

En febrero de 1797 llegó a España. Incorporó la prensa hidráulica al Real Gabinete de Máquinas, y solicitó al monarca permiso para su matrimonio canónico con Ana de Jourdan que tendría lugar en abril (Sáenz Ridruejo, 2016). Por otro lado, la expedición del conde de Mopox a la que se había comprometido, reclamó su presencia en Cuba. Betancourt consiguió el instrumental necesario, perdido en la expedición de noviembre, y partió rumbo a la Habana. Tras un día de navegación, el 9 de junio de 1797 fue apresado por la fragata Boston, el material nuevamente requisado y sus pasajeros desembarcados en Lisboa. Así pues, a la creciente tensión con Godoy se unía la mala suerte. Finalmente, Betancourt renunció al proyecto del conde de Mopox y pidió permiso al príncipe de la Paz para ir a París con el fin de enviar, esta vez con éxito, el material necesario (Egorova, 2009). Con escasa previsión llegó a París en septiembre de 1797. Allí, aparte de reunir el instrumental, consiguió reabrir la polémica sobre el telégrafo óptico con la ayuda de Prony (Figura 1.5). Betancourt y Breguet escribieron una memoria sobre su versión del telégrafo con la intención de exponerlo ante la *Academia de Ciencias* comparándolo con el de Chappe. La comisión alabó el modelo, pero el invento no llegó a ponerse en práctica (García Diego, 1975). En cambio, para sorpresa del canario, España sí tenía interés en realizar esa instalación.

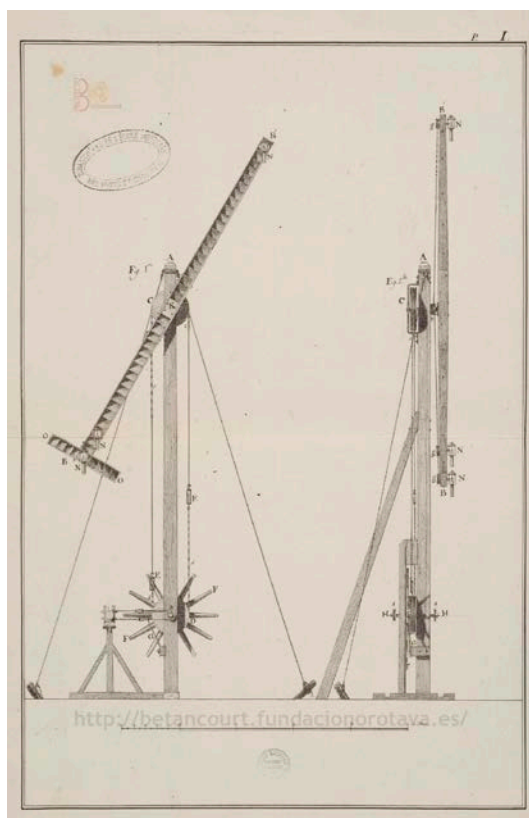


Figura 1.5. Telégrafo óptico (Betancourt y Molina, 1797).

En noviembre de 1798, se dedicó en cuerpo y alma a la instalación de la primera línea telegráfica en España. La idea original era unir Madrid y Cádiz mediante una línea telegráfica, y para ello era necesario instalar entre 60 y 70 telégrafos. La instalación y elaboración de los telégrafos llevó su tiempo. Así pues, los años 1799 y 1800 los dedicó a la instalación de la línea telegráfica y su

mejora, pero en octubre de 1800 la instalación se detuvo. La línea, que ya prestaba servicio en Aranjuez, dejó de ser prioridad del Estado y el ministro de Hacienda ordenó su detención (Villar-Ribera *et al.*, 2011). Este telégrafo fue usado años más tarde en Rusia (Shilov *et al.*, 2012).

En el verano de 1799, Betancourt compró la Real Fábrica de Algodón de Ávila y la visitó para hacerse cargo de las necesidades de la misma. Al frente de la misma puso a su hermano Marcos, aunque esta empresa tuvo poco éxito como se verá más adelante (Proyecto Digital Betancourt).

En junio de 1799, se creó la Inspección General de Caminos y Canales, bajo la dirección del secretario de Estado, Mariano Luis de Urquijo. En un primer momento, se pensó en Betancourt para ese puesto, pero éste lo rechazó por su dedicación al telégrafo. El cargo lo ocupó José Nadín y Guzmán, conde de Guzmán, aunque sólo lo ejerció durante algunos meses de 1801.

En septiembre del mismo año, hizo un reconocimiento del canal de Castilla con Peñalver con vistas a la reactivación del mismo. Juntos escriben un informe y elaboraron planos para su reactivación, y asimismo escribió un informe para la elección del trazado de la carretera que debía unir La Rioja con Santander con vistas a facilitar el comercio del vino. En diciembre de ese año, Betancourt pasaría a ser el Inspector General de Caminos y Canales, puesto que significaba una coronación al prestigio que tenía como ingeniero, tanto en España como en Europa (Sáenz Ridruejo, 2016).

El 30 de abril de 1802, se rompió la presa de Puentes en Lorca, provocando más de seiscientas víctimas mortales en la localidad murciana. Betancourt viajó a la zona del siniestro, y en julio, escribió un informe demoledor señalando la falta de preparación del arquitecto como la causa del desastre. Este argumento fue decisivo para que Godoy entendiera la necesidad de la creación de una escuela de ingenieros donde la formación fuera más científica. Las escuelas existentes hasta la fecha eran dos, la de San Isidro y la Academia de Bellas Artes de San Fernando. La escuela de San Isidro preparaba a sus alumnos en la Escolástica (se aprendía a dominar la forma, la lógica y el pensamiento abstracto), y por otro lado, la Real Academia de San Fernando centraba su formación en las bellas artes. Los alumnos de este segundo centro, algunos de los cuales trabajaron finalmente como arquitectos e ingenieros, dominaban los tratados clásicos sobre la proporción y la estética, pero no tenían ninguna formación técnica. Había, por lo tanto, una deficiencia grande en el campo del cálculo de estructuras (Bogoliúbov, 1986a).

En octubre de 1802, se produjo la convocatoria para el examen de ingreso para los estudios de la Inspección General de Caminos y Canales y, en noviembre, empezaron las clases en el Palacio del Buen Retiro junto al Real Gabinete de Máquinas. El cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales se creó por orden real en julio de 1803, y a partir de ese momento, se pasó a llamar Escuela de Ingenieros de Caminos y Canales a la ubicada en el Palacio del Buen Retiro. Los primeros profesores fueron viejos conocidos de Betancourt: José María Lanz, Juan López de Peñalver y José Chaix, entre otros, estando Betancourt al frente de esta institución hasta 1807 (Rumeu de Armas, 1968).

Con José María Lanz trabajaría en el más importante ensayo de su carrera y cumbre de su actividad científica, la memoria sobre la composición de las máquinas, que además fue obra de referencia para varias generaciones de ingenieros europeos. Esta memoria se publicó en francés en París en 1808, y se tradujo a varios idiomas (López-Cajún *et al.*, 2004).

Otra de las memorias sobre las que trabajó fue sobre el estado de los caminos y canales de la época, fruto de su experiencia y de las distintas visitas como inspector. A parte de señalar las que a su juicio eran las líneas de actuación más urgentes, propuso la reorganización del órgano de la Inspección General para lograr que fuera más eficaz (Muñoz Bravo, 2008a).

Entre 1803 y 1805, siguió de cerca las obras de la presa de Puentes y las de la finca 'Soto de Roma' que Godoy tenía en la provincia de Granada. Ambas empresas las dirigía su discípulo y amigo Rafael Bauzá. Sin embargo, las reformas en la finca del valido con el fin de evitar los daños que las periódicas inundaciones que el río Genil producía, fueron nuevamente motivo de tensión entre el canario y Godoy, que finalmente puso al frente de su reforma a un grupo de ingenieros militares (Muñoz Bravo, 1987).

Betancourt era consciente de la complicada relación que tenía con Manuel Godoy, que era cada vez más poderoso. Su amistad personal con el monarca que en 1803 le había nombrado Mariscal de Campo del ejército, ya no era obstáculo para que 'El príncipe de la Paz' mostrara abiertamente en presencia de Carlos IV su profundo malestar hacia él. A este malestar se unieron dos factores más: por un lado, la disputa que se produjo debido a la situación de la Real Fábrica de Algodón y, por otro lado, a las circunstancias políticas en torno al enfrentamiento entre los partidarios del príncipe de Asturias (Fernando VII) y Carlos IV (Naveros Naveiras, 2011).

La Real Fábrica de Algodones era un agujero económico debido, en parte, al cese del comercio con América provocado por la marina inglesa. Betancourt quiso deshacerse de ella, pero al ser una Real Fábrica encontró una serie de impedimentos legales que no podía solventar. La propiedad debería volver a manos del Estado con la pérdida económica que supondría para el canario al no poder venderla. En 1806, su hermano Marcos que hasta entonces estaba al frente de la Real Fábrica, murió. Finalmente, consiguió vender la Fábrica a su amigo del industrial Ingram Binns, pero a costa de imponer su voluntad al Estado (Sáenz Ridruejo, 1986).

A tenor de estos acontecimientos, Betancourt resolvió que lo más sensato era, marchar de nuevo rumbo a Francia. Envío la familia por delante, su mujer y cuatro hijos (en 1805 nace el único varón, Alfonso), y en marzo tuvo la alegría de ser nombrado miembro corresponsal de la Academia de Ciencias de París. Anecdóticamente en esa misma sesión, fue también nombrado miembro de la Academia James Watt. La idea inicial de Betancourt era la de pasar en París una temporada hasta que la situación política en España volviera a la normalidad, pero esta condición nunca volvió a darse y el canario no regresó a España (Sáenz Ridruejo, 2016).

Betancourt llegó a París en mayo de 1807. En junio y julio se dedicó a la redacción de la memoria sobre un nuevo sistema de navegación interior en el que incluía una esclusa movida por un pistón, y que tenía la virtud de no consumir agua en el alzado y descenso de embarcaciones, inventada en 1801, así como una adaptación de la esclusa de plano inclinado que vio en Coalbrookdale durante su estancia en Inglaterra. La memoria sería examinada por la Academia y publicada en 1807 (Prony, 1807, 1809; Betancourt y Molina, 1807).

Durante esas fechas, la propia Academia dio noticias al zar Alejandro I del ingeniero español. El propio zar invitó a Betancourt a la corte de San Petersburgo para hablar de posibles proyectos en Rusia. En octubre viajó a San Petersburgo, y algo después tuvo una audiencia privada con el zar y su ministro Rumyantsev. Ambos le ofrecieron unas proposiciones de trabajo muy favorables y le permitieron visitar las industrias del país durante cinco meses. Betancourt volvió a París con la promesa de consultar la propuesta con la familia (Muñoz Bravo, 2008b).

Todo parece indicar que en un principio Betancourt no tenía mucha intención de marchar de Francia. De hecho, durante su estancia en Rusia había enviado al gobierno francés los planos de una draga para puertos (similar a la desechada por el gobierno español para los puertos de Cartagena y Cádiz) (Betancourt y Molina, 1808a, 1808b). Pero la situación del gobierno francés respecto a España cambiaría drásticamente en mayo de 1808, y Betancourt decidió aceptar la invitación del zar Alejandro para trabajar en Rusia. Durante los meses que todavía estuvo en París, presentó en l' École Polytechnique, su ensayo sobre la composición de las máquinas con la colaboración de José María Lanz. La acogida del texto fue excelente y fue publicada ese mismo

año (López-Cajún, *et al.*, 2004). En una carta que Betancourt escribió a Floridablanca, poco antes de la muerte de éste, y que no llegó a recibir, contó que había recibido ofertas del mismo Napoleón para trabajar en la administración de José Bonaparte, pero declinó la oferta al considerarla traicionar sus principios (Sáenz Ridruejo, 2016).

Betancourt se despidió de París en octubre de 1808 y aprovechó la reunión de Napoleón con Alejandro I en Erfurt para marchar con el zar a San Petersburgo. En París dejó la administración de todos sus bienes en manos de Breguet. El 30 de octubre ya estaba instalado en San Petersburgo con la familia (Proyecto Digital Betancourt). La estancia en Rusia duraría hasta el final de su vida y los dieciséis años que allí pasó fueron muy fructíferos.

Alejandro I recibió a Betancourt con franca estima. Le confirmó en su grado de mariscal de campo, le asignó una pensión generosa, le nombró inspector general de las vías de comunicación del Imperio y poco después, le ascendió a Mayor General para misiones especiales de su Majestad Imperial en el departamento de Vías de Comunicación. Dicho cargo dependía del ministro, conde de Rumyántsev. En un año, el departamento se transformó en Dirección General, creándose el cuerpo de Ingenieros y aprobándose un centro de estudios para su formación. Así pues, Betancourt consiguió en un año lo que había luchado en España durante tanto tiempo. En septiembre de 1809 fue nombrado Inspector del Instituto de Vías de Comunicación, y poco después se aprobó el reglamento de la Escuela de Ingenieros. El sistema diseñado por el canario era muy parecido al sistema francés (un cuerpo de asignaturas teóricas de carácter técnico más una escuela de aplicación donde plasmar ese conocimiento). Como director del Instituto, abrió las puertas para que el alumnado encontrara proyectos donde desarrollar las competencias adquiridas, logrando en pocos años, la alta formación de varias generaciones de ingenieros competentes y experimentados (Bogoliúbov, 1986b; Egorova, 2007).

La Escuela ya tenía un programa y unas líneas de actuación bien definida, pero Betancourt era consciente de la necesidad de buenos profesores que llevaran a cabo esa labor con profesionalidad. Con vistas a formar un cuerpo de profesores para la Escuela, se puso en contacto durante esta época, con varios ingenieros franceses de prestigio formados como él en la escuela francesa. También se trajo a Rusia a varios ingenieros españoles, pero todos se dedicaron a trabajar en proyectos del departamento de Vías de Comunicación. Entre estos se encontraba su gran amigo Rafael Bauzá (Bogoliúbov, 1969).

Entre los profesores franceses cabe destacar fundamentalmente dos figuras de prestigio: Gabriel Lamé y Émile Clapeyron que fueron profesores de la Escuela de Ingenieros rusa hasta 1831. Otros profesores fueron Dominique Bazaine, que sustituiría a Betancourt como director de la Escuela a su muerte, Maurice Destrem, Charles Potier y Auguste Ricard de Montferrand. En los últimos años de director otros profesores también se fueron incorporando como Antoine Raucourt, Guillaume Ferrandin-Gazan o André Henri.

Los profesores franceses tampoco lo tuvieron fácil y, en 1812 debido a la guerra contra Napoleón, Alejandro I ordenó confinar a los profesores de la politécnica en un campo de concentración en Siberia del que no retornarían hasta 1815 (Gouzévitch y Gouzévitch, 1993).

Entretanto la actividad de Betancourt seguía febrilmente. En el año 1809, se le encomendó hacer un estudio de la fábrica de cañones de Tula. Con la experiencia adquirida en Yndrid (Francia) modernizó la misma, integrando la máquina de vapor como elemento propulsor en vez de la fuerza hidráulica. De vuelta a San Petersburgo conoció al escocés Charles Baird, armador de inquieto talento, con el que rápidamente congenió. Las instalaciones de Baird sirvieron para realizar muchas de las prácticas estudiadas por Betancourt y Bazaine. Entre otras cosas, trabajaron durante un tiempo en una memoria sobre el transporte marítimo a vapor y Baird se prestó a poner su maquinaria al servicio de ambos, creando el primer barco de vapor del Imperio y uno de los primeros europeos. Más adelante, el proyecto del siderómetro de

Betancourt también se materializó en sus talleres, donde se realizaron las primeras pruebas de resistencia de materiales de las que se tiene conocimiento, sirviendo de esta forma para probar la calidad del hierro ruso para la construcción de estructuras (Gouzévitch y Gouzévitch, 2002).

De sus invenciones se tienen obras importantes. La draga mecánica del puerto de Kronstadt, con la que retomaba el proyecto que había viajado por media Europa, se materializó con éxito en 1812 dando servicio hasta 1820. En 1816 diseñó una imprenta basada en la prensa copiada a Bramah para crear papel moneda en la nueva fábrica de moneda que le encargaron en San Petersburgo y que se ejecutó junto al canal de Fontanka. También se sabe por Bartolomé Sureda, que pasó un año en San Petersburgo, inventando una máquina para hilar lana en 1818 de la que él dibujó los planos (Cioranescu, 1965).

En 1811 recibió la condecoración de la orden de San Alejandro Nevsky, la segunda distinción civil más importante del Imperio. Como inspector del departamento de Vías de Comunicación desde 1810 se especializó en puentes. Fue director de obras de varios puentes sobre el río Izhor y Slavianka, diseñando varios arcos triunfales en diversos lugares. En 1811 diseñó el primer gran puente de arco hecho en Rusia, el puente Kamnnoostrovski sobre el pequeño Neva. En 1813 propuso la creación de un museo de transporte ferroviario que se ejecutaría ese mismo año, donde se recibían modelos y memorias de los proyectos ferroviarios de algunos países. Este museo fue el precursor del ferrocarril en Rusia, que vio la luz en tiempos del zar Nicolás I, heredero de Alejandro (Sáenz Ridruejo, 2016).

En 1816 tras la victoria sobre Napoleón, Alejandro I le nombró director del Comité de Construcciones y Obras Hidráulicas ocupándose de las obras de la ciudad imperial. Con motivo de la victoria, Betancourt realizará varios encargos de monumentos conmemorativos en San Petersburgo. Además, se le encomendó la reconstrucción de la catedral de San Isaac y la reconstrucción de las caballerizas de Moika, siendo obra suya también, el canal Obvodny que proyectó con el arquitecto Franz de Wolant y los edificios de la plaza del senado (Proyecto Digital Betancourt).

Pero el proyecto en el que más empeño puso fue la construcción de la gran feria de Novgorod (Figura 1.6).



Figura 1.6. Proyecto para la feria de Nizhny Novgorod.
(Fuente: Dibujo de Iván Ivánovich Shishki, 1824)

En 1816 un incendio destruyó la feria de Makaríev, la feria más importante a lo largo del Volga. Rumyantsev decidió cambiar su lugar a Novgorod en la unión de los ríos Oka y Volga, y para ello propuso a Betancourt que se encargara de la realización y ejecución del proyecto. Esta

descomunal obra duró hasta junio de 1822. El recinto se encontraba rodeado por un canal navegable al que se tenía acceso desde el Volga y contaba con diez edificios, cuarenta y ocho tiendas, una iglesia e incluso un puente móvil sobre el río Oka. En la ejecución del proyecto trabajaron la mayor parte de los ingenieros españoles venidos a Rusia. Bauzá destacó en su trabajo, y en 1816 ya había trabajado con Betancourt en la Casa de la Moneda de Varsovia instalando incluso una máquina de vapor, pero algunos otros no dieron la talla y empezaron a crear problemas a Betancourt (Bogoliúbov, 1986a).

Otro proyecto que tuvo un éxito internacional fue la Sala de ejercicios ecuestres de Moscú. El diseño de Betancourt era completamente original. La genialidad de la misma residía en la construcción de unas cerchas de madera de 45 m de luz, lo que hacía que el espacio interior de la misma fuera extraordinariamente grande. La dificultad del proyecto residía tanto en la geometría de la cercha, capaz de soportar el peso de un tejado de grandes dimensiones, como en el material empleado, pues las cerchas de la época eran todavía de madera. Para resolver este problema utilizó hierro en los nudos de las cerchas proporcionando a la estructura la conveniente resistencia. La memoria que escribió sobre esta sala ecuestre se publicó en 1819 y fue una obra de referencia en Rusia (Martín Medina, 2006).

En 1819 fue nombrado Director General del departamento de Vías de Comunicación estando presente en las sesiones del consejo de ministros. Este nuevo cargo le fue apartando del trabajo de campo para dedicarse más a la dirección de proyectos. En 1820 se le presentó la oportunidad de realizar un informe sobre las vías de comunicación del Imperio. El largo viaje que partiría de Novgorod, llegaría hasta el Cáucaso (Tbilisi) (Figura 1.7), de allí hasta Sebastopol y Odessa, y finalmente, volvería a Moscú atravesando Ucrania. Al llegar a San Petersburgo redactó un informe en el que se lamentaba del estado de las carreteras y caminos encontrados. Durante el viaje se reunió con los responsables de las distintas zonas proponiendo una serie de mejoras. Pero la conclusión del informe fue negativa: existía una gran diferencia entre las vías de comunicación de San Petersburgo y Moscú, y las del resto del país. Del informe podía entenderse que el Gobierno nunca se había ocupado de las vías de comunicación de la mayor parte del territorio ruso. Esta observación la hizo constar en su memoria y no sentó bien al zar.



Figura 1.7. Panorámica de Tbilisi.
(Fuente: Dibujo de Nicanor Grigorievich Chernetsov, 1832)

A partir de este momento las relaciones con el zar se fueron volviendo más tirantes y menos frecuentes: dejó de tener acceso inmediato a su persona. Todavía proyectaría y ejecutaría el puente flotante sobre el gran río Neva, y contribuiría a la aparición de los primeros barcos de vapor rusos. En enero de 1822, el zar le llamó para echarle en cara los gastos por la construcción de la feria de Novgorod. Además, el zar había sido informado de ciertas irregularidades por parte de alguno de los ingenieros españoles que además de gozar de la protección de Betancourt eran conocidos por sus ideas liberales, y en marzo, el zar nombró director del departamento de

Vías de Comunicación a un familiar suyo, el duque Alejandro Wütenberg, destituyendo al ingeniero del cargo (Sáenz Ridruejo, 2016).

Finalmente, Betancourt fue poco a poco dejando toda actividad, aunque siguió al frente de la Escuela de Ingenieros hasta su muerte el 16 de febrero de 1824, a los 66 años de edad. Su entierro tuvo todos los honores de su rango, y su mujer recibió del emperador la concesión del sueldo de su marido de por vida (Proyecto Digital Betancourt).

1.3. Su obra científica y técnica

El siglo XVIII es conocido en la historia europea como el siglo de la Ilustración, el de las Luces y la Razón. El impulso ilustrado tuvo como origen Francia, pero su vocación era universal, y como tal, llegó a casi todos los rincones del continente; quizás no del mismo modo, ni unido a un sistema político similar, pero en pocos decenios cambió a toda la sociedad. Desde el punto de vista técnico y científico los últimos decenios de siglo coinciden con una primera revolución industrial. En la Península, los historiadores han subrayado que el primer conato de industrialización tuvo lugar en tiempos de Carlos III y cristalizó en forma de Reales Fábricas, cuya industrialización fue complicada y no tuvieron éxito desde el punto de vista comercial. Al calor de estas iniciativas aparecieron los primeros científicos y técnicos españoles en contacto con los técnicos llegados a España procedentes de Francia, Inglaterra y Alemania fundamentalmente. Sin embargo, la vida de Betancourt no se puede enmarcar dentro de este patrón porque su formación no es la común de la época; él no tuvo un maestro que le enseñara un oficio técnico o científico, y se puede decir, que es el primer español que sale a formarse en los centros más prestigiosos de Europa. Su preparación como ingeniero no tiene parangón con la de ningún otro ingeniero español (AA.VV., 2009).

El ingeniero español entró en contacto con las cabezas más prestigiosas del momento. Su formación internacional le dio las herramientas necesarias para convertirse en el ingeniero más polivalente del momento, una persona muy adelantada a su tiempo que supo intuir hacia donde iba el desarrollo de las vías de comunicación en el futuro. Betancourt fue mucho más que un ingeniero de caminos, sus dotes para la mecánica y para la actividad científica hacen que su obra no se pueda catalogar en un solo lugar. Compaginó el estudio teórico con la aplicación práctica, escribió memorias sobre el estado de las comunicaciones de una región y a la vez inventó una máquina para hacer tornillos lo más homogéneos posibles. Esta versatilidad fue poco valorada en España y despertó recelos (bien fundados) en Inglaterra. Sólo en Francia y en Rusia, Betancourt fue valorado como un hombre de grandísima talla y se le dio la oportunidad de desarrollar todo su potencial técnico y científico (Rumeu de Armas, 1980).

La obra de Betancourt, como se desprende al leer su biografía, ocupó un período de tiempo bastante largo, y se distribuyó de manera desigual por varios países. Entre los dibujos que realizó en Canarias de una máquina epicilíndrica para entorchar seda presentada por su hermana María a la Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife, y el proyecto de los abastecimientos de agua de la población de Kazán, hay 44 años de diferencia y cerca de 5.000 km de distancia. Además, a las dificultades de la distribución geográfica y temporal, hay que añadir que algunas de sus memorias se perdieron irremediablemente, como las obras que quedaron en el Real Gabinete de Máquinas, que fueron pasto de las llamas francesas al incendiar el palacio del Buen Retiro. También hay que señalar que la figura del ingeniero español solamente ha salido a la luz recientemente. Durante más de un siglo nadie habló ni de su obra ni de la importancia de su figura; sólo recientemente se han multiplicado sus estudios cuando probablemente parte de su obra se ha perdido y no hay más referencias de ellas que por la correspondencia de Agustín con algún conocido o por comentarios de terceros (Proyecto Digital Betancourt).

Por todos estos motivos, tratar de establecer un elenco exhaustivo de toda la obra científica y técnica de Agustín de Betancourt y Molina, sería el objeto de una tesis histórica. La Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia ha hecho un esfuerzo ímprobo por reunir gran parte del material existente sobre la figura de Agustín de Betancourt y Molina. Además, ha fomentado la investigación sobre este magnífico personaje. En base a este legado y al escaso material encontrado en alguna obra citada en la biografía, se ha elaborado un elenco de las obras de Agustín de Betancourt y Molina. Sus obras científicas y técnicas ordenadas cronológicamente son:

- *Máquina epicilíndrica para entorchar seda* (1778) con su hermana María.
- *Noticia sobre la Acequia Imperial o canal Real de Aragón* (1783) escrita con Alonso de Nava y Grimón.
- *Primera memoria sobre las aguas existentes en las Reales Minas de Almadén* (1783).
- *Segunda memoria sobre las máquinas que usan en las Minas de Almadén* (1783).
- *Tercera memoria sobre todas las operaciones que se hacen dentro del cerco en que están los hornos de fundición del Almadén* (1783).
- *Memoria sobre la purificación del carbón de piedra y modo de aprovechar las materias que contiene* (1785).
- *Telar para la confección de cintas de rasolino y tafetán* (1786).
- *Mémoire sur une machine à vapeur à double effet* (1789).
- *Memoria sobre una máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos* (1789) (Perdida) existe un detalle en un documento titulado *Sur le nouveau moulin à vent de Ms. Menault* (sin fecha).
- *Molino harinero propulsado por su máquina de vapor* (1790) junto a los hermanos Pérrier.
- *Mémoire sur la force expansive de la vapeur de l'eau* (1790).
- *Descripción del establecimiento de Yndrid donde se funden y barrenan los cañones de hierro para la Marina Real de Francia* (1791).
- *Catálogo de la colección de Modelos, Planos y Manuscritos que, de orden del Primer Secretario de Estado, ha recogido en Francia Don Agustín de Betancourt y Molina* (1792).
- *Memoria sobre los medios para facilitar el comercio interior* (1792) escrito con Juan López de Peñalver.
- *Informe dirigido al Duque de la Alcudia sobre la bomba hidráulica diseñada por Francisco Zacarías* (1793).
- *Description of the plate of the machine for cutting weeds in navigable canals and rivers* (1795).
- *Explication des principales parties du moulin pour moudre le silex* (1796).
- *Mémoire sur un nouveau télégraphe et quelques idées sur la langue télégraphique* (1797).
- *Dessin de la machine pour faire Monter et descendre les Bateaux d'un canal inférieur et réciproquement, su deux plans inclinés, exécutée en Angleterre [...] du pont de fer à Coalbrookdale* (1796).
- *Prensa hidráulica* (1797) basada en la de Joseph Bramah.
- *Máquina para hacer clavos* (1798).
- *Informe dirigido a Mariano Luis de Urquijo sobre el método de transmitir noticias a distancia por medio de señales inventado por José Fornell* (1799).
- *Description d'une machine à couper les roseaux et les autres plantes aquatiques qui obstruent beaucoup de Canaux et de rivières navigables* (1800).
- *Observaciones hechas en el Retiro para determinar el movimiento del Péndulo de Robin* (1800).
- *Plano general del Proyecto executado y por executar de los canales de Castilla* (1801?).
- *Noticia del estado actual de los caminos y canales de España, casusa de sus atrasos y defectos, y medios de remediarlos en adelante* (1803).
- *Description abrégée de la machine employée au Canal du Midi, pour couper les plantes aquatiques qui gênent la Navigation* (1805).

- *Proposition pour établir une nouvelle machine pour creuser le canal et le Port de Venise* (1807).
- *Mémoire sur un nouveau système de navigation intérieure* (1807).
- *Pantano de Valdeinfierno: obras que se han de hazer, y subasta de materiales [...]* (1808).
- *Explication d'une machine destine à curer les ports de mer* (1808).
- *Imprenta para crear papel moneda* (1816) basada en la de Joseph Bramah.
- *Siderómetro para realizar pruebas de esfuerzos sobre el hierro* (1816) con Charles Baird.
- *Máquina para hilar lana* (1818).
- *Description de la Salle d'Exercice de Moscou* (1819).
- *Essai sur la composition des machines*. La primera edición incluía el *Programme du cours élémentaire des machines pour l'an 1808 par M. Hachette* (1808), y su traducción al inglés *Analytical essay on the construction of machines* (1820).
- *Rapport sur différents sujets relatifs aux voies de communication en Russie* (1820).
- *Primer barco de vapor ruso propulsado por su máquina de doble efecto* (1822) junto a Charles Baird y Dominique Bazaine.

1.4. Aportaciones a la ingeniería civil

Muchas son las aportaciones al mundo de la ingeniería civil del ingeniero español. El mérito de algunas de ellas no sólo está en la originalidad de los ingenios (algunos de ellos son el primer modelo real que existe de ese invento) sino en el dominio de la mecánica que plasma en sus mecanismos, los cuales le otorgan una precisión y una funcionalidad que los hace mucho mejores que las primeras patentes que existen de dichos ingenios (Bogoliúbov, 1973).

Betancourt no solamente es un inventor que se dedica a buscar patentes con las que alimentar una empresa personal. Sus inventos vienen acompañados de memorias, tratando de mostrar las entrañas de todos sus ingenios para que sirvan a cualquier persona en cualquier lugar. Así pues, partiendo de una necesidad, establece los principios teóricos para llegar a la solución óptima, y a dicha solución, le aplica los conocimientos de los materiales y propone un modelo concreto. Finalmente, sobre el modelo señala las disposiciones necesarias para que trabaje en condiciones óptimas. Esta manera de realizar sus memorias sigue el mismo patrón en la mayor parte de las memorias que han llegado, sobre todo en aquellas que presenta a la Academia Francesa para su evaluación (Bogoliúbov, 1986b; Gouzévitch y Gouzévitch, 2002).

A continuación, se presenta un elenco, seguramente incompleto, de los ingenios de Agustín de Betancourt y Molina, relacionados con la ingeniería civil:

- Primer globo aerostático volado en España (de algo más de 2 metros de diámetro realizado de tafetán barnizado), unas semanas antes del de su paisano José Viera y Clavijo, que partió del Escorial y llegó hasta el Espinar (29 de noviembre de 1783).
- Máquina eólica para desaguar los terrenos pantanosos (1789).
- Máquina para limpiar los fondos de los puertos (1792) (primera aproximación a su dragadora).
- Máquina para cortar las cañas y otras plantas acuáticas en canales y ríos navegables (1795).
- Molino de accionamiento hidráulico para la molienda del sílex (1796).
- Telégrafo óptico (1796) con Abraham Louis Breguet.
- Esclusa de émbolo buzo (1801).
- Esclusa de plano inclinado accionada por el émbolo buzo (1807) (es la que avistó en Coalbrookdale sobre el río Severn pero accionada por su esclusa de émbolo buzo).
- Primer puente de arco realizado en Rusia (1810).
- Dragas mecánicas del puerto de Kronstadt (1810).
- Cercha de madera y hierro para la sala de Ejercicios Ecuestres de Moscú (1819).

- Primer barco de vapor ruso propulsado por su máquina de doble efecto (1822) junto a Charles Baird y Dominique Bazaine.

1.5. Línea de investigación

La presente tesis doctoral se desarrolla en el seno del Programa de Doctorado “*Ingeniería agraria, alimentaria, forestal y del desarrollo rural sostenible*” por la Universidad de Córdoba y de Sevilla, adscrito a la Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación (eidA3), al amparo del Campus de Excelencia Internacional en agroalimentación (ceiA3).

Concretamente, dicha tesis doctoral se desarrolla en la línea de investigación “*Diseño en la Ingeniería y Arquitectura*”, la cual viene desarrollando el director de la tesis en el grupo de investigación que lidera “*Ingeniería Gráfica y Arqueología Industrial*” creado por él mismo en 1995 en el seno del II Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Junta de Andalucía, y del que el doctorando forma parte como miembro investigador desde 2016.

1.6. Objetivos de la tesis doctoral

El objetivo general de la tesis doctoral es presentar un estudio completamente original e innovador de las aportaciones relacionadas con la ingeniería civil de Agustín de Betancourt y Molina, susceptibles de estudio mediante técnicas de ingeniería gráfica. Los objetivos concretos que se persiguen son:

1. Recopilación bibliográfica para definir y clasificar la obra de Agustín de Betancourt.
2. Aplicación de las técnicas de ingeniería gráfica sobre las aportaciones históricas más importantes de Agustín de Betancourt y Molina relacionadas con la ingeniería civil susceptibles de ser estudiadas (modelado CAD 3D (del inglés *Computer-Aided Design*), generación de planimetría detallada 2D y simulación por ordenador), habiéndose seleccionado las siguientes:
 - Máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos (1789).
 - Máquina para cortar las cañas y otras plantas acuáticas de los canales y ríos navegables (1795).
 - Molino de accionamiento hidráulico para moler el sílex (1796).
 - Esclusa de émbolo buzo (1801).
 - Draga mecánica del puerto de Kronstadt (1810).
3. Obtención de las impresiones 3D de las invenciones históricas analizadas.
4. Análisis estático de dichas aportaciones mediante la aplicación de las técnicas de ingeniería y simulación asistidas por ordenador (CAE, del inglés *Computer-Aided Engineering*).
5. Discusión de resultados, conclusiones y difusión académica.

CAPÍTULO 2

MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Introducción

En este capítulo se describe el proceso de investigación presentando los materiales y el marco teórico en el que se basa la metodología.

El material de partida es únicamente la información disponible en el Proyecto Digital Betancourt de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia promovido por el Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU), el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), el Ministerio de Fomento y la Fundación Juanelo Turriano (Proyecto Digital Betancourt). El objetivo del mismo es la recuperación, digitalización y puesta en Internet de su obra, tales como memorias, informes, publicaciones, dibujos, planos, cartas personales o reproducciones de maquetas de máquinas o edificios de su autoría.

La metodología empleada ha sido la restitución digital de los modelos 3D utilizando como herramienta Autodesk Inventor Professional 2016, software paramétrico de diseño e ingeniería asistidas por ordenador de grandes prestaciones desarrollado por Autodesk con kernel de modelado geométrico basado en ACIS.

Gracias al concurso de dicho software, se posibilitará obtener el análisis estático de las invenciones objeto de estudio a partir de un modelo CAD (del inglés, *Computer-Aided Design*) fidedigno, caracterizándose funcionalmente cada una de ellas; esto es, obtener las tensiones de von Mises, las deformaciones y desplazamientos obtenidos, así como el coeficiente de seguridad de dichas invenciones históricas, consiguiendo de esta forma su caracterización funcional completa. Asimismo, se obtendrán recreaciones virtuales del funcionamiento y montaje de las mismas.

Los resultados obtenidos al aplicar dicha metodología supondrán un avance sobresaliente de cara a la difusión de los mismos, y al acercamiento al usuario de las obras más significativas del genial ingeniero español. No en vano, dichos resultados se podrían exponer en la web de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia en el sitio web del Proyecto Digital Betancourt, así como en la Fundación Agustín de Betancourt que son los dos Entes Promotor-Observador (EPO) que han manifestado interés en los resultados del Proyecto de Investigación.

2.2. Diseño Asistido por Ordenador

2.2.1. Introducción

Los actuales programas CAD tienen su origen en varios estudios sobre control numérico y automatización del diseño para la ingeniería que se desarrollaron en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) en la década de los años 50. Dos personas son los padres de los primeros programas: Patrick Hanratty e Ivan Sutherland. En 1957 Hanratty, ingeniero de General Electric, desarrolló PRONTO, el primer sistema de programación CNC (Computer Numerical Control), que comprendía todo el conjunto de datos que una máquina necesitaba para la mecanización de una pieza. Esto supuso un cambio importante en el proceso industrializador con la incorporación de ordenadores, todavía muy básicos, para este proceso. En 1963 Sutherland presentó su tesis doctoral en el MIT titulada “Sketchpad: a man-machine graphical communications system”, dando lugar a la primera interfaz gráfica: un bolígrafo laser que podía dibujar sobre una pantalla de rayos catódicos objetos con bastante precisión. Además, los puntos del objeto dibujado podían ser almacenados y reproducidos por otros ordenadores (Cohn, 2010).

En los años sucesivos, aparecieron muchos trabajos que ayudan en la evolución del dibujo 2D, entre los que cabe destacar el digitalizador fabricado por la empresa Auto-trol, o el primer sistema de gráficos interactivos de producción DAC-1, desarrollado por General Motors e IBM. A finales de los años 60 se fundaron varias compañías que comercializaron los primeros programas CAD, aunque estos estaban muy dirigidos a la producción industrial (SDRC, Evans&Sutherland, Applicon, Computervision, y M&S Computing).

Los años 70 trajeron consigo un primer intento de pasar del dibujo 2D al 3D. En Francia, dos ingenieros del mundo de la automoción, inventaron un modelo matemático para simplificar y definir superficies curvas. Pierre Bézier, padre de las curvas B-splines, acabó imponiendo su modelo para desarrollar a su vez superficies, y Keneth Versprille adaptó estas superficies, NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline), como estándar para la creación de superficies 3D en los sistemas CAD. Desde entonces los programas CAD generan de este modo las superficies. Por otro lado, durante esta década también se creó el lenguaje computacional PADL (Part and Assembly Description Language), que facilitaba la modelización de piezas y ensamblaje.

El principio de los años 80 trajo varias novedades. IBM popularizó los ordenadores personales (PC, del inglés *Personal Computer*), siendo el punto de partida de los primeros programas comerciales. Asimismo, la industria aeroespacial y automotriz, contribuyó al desarrollo de software comercial. Así pues, CATIA, vinculada a la aeronáutica francesa, desarrolló un producto muy comercial que se impuso en las estaciones de trabajo con sistema operativo UNIX. En 1983 un grupo de programadores de la empresa Autodesk lanzó AutoCAD primer programa significativo que se adaptaba perfectamente a las características del PC de IBM (Cohn, 2010).

AutoCAD fue uno de los grandes hitos de la evolución del CAD. Desarrollaron un producto muy versátil para las características de los ordenadores de aquel tiempo a un precio sin parangón entre los programas CAD de la época. Así pues, la tecnología CAD llegó al gran público, pero en 2D, ya que las exigencias de procesador para el CAD 3D eran excesivas para los PC.

En 1987 la empresa americana PTC (Parametric Technology Corporation) desarrolló Pro/ENGINEER, el primer programa paramétrico para definir piezas y ensamblajes. Los objetos modelados estaban definidos por una serie de parámetros, y al modificar alguno de ellos, las características del objeto se actualizaban automáticamente. Debido a los altos requerimientos computacionales, este software se vinculó pronto a las estaciones de trabajo UNIX. Tras este programa pionero, pronto aparecieron otros motores de modelado tridimensional cuya principal herramienta era el historial de modelado como ACIS y Parasolid, usados en diverso software CAD.

El principal hito de los años 90 fue la evolución de los procesadores para PC, lo que facilitó la realización de los cálculos necesarios para modelar en 3D. Conscientes de esto muchas compañías desarrollaron productos para aprovechar esta oportunidad. En 1995 se lanzó SolidWorks, el primer modelador 3D consistente para el entorno Windows. En años sucesivos aparecieron otros programas como SolidEdge, desarrollado por Siemens con motor Parasolid, o Inventor Professional, desarrollado por Autodesk con motor ACIS. Las compañías que desarrollaron la industria CAD en los años 60 fueron adquiridas por otras nuevas lo cual dejó en el mercado a cuatro grandes compañías: Autodesk, Dassault Systèmes (que en 1997 adquirió SolidWorks), PTC y Siemens PLM (Cohn, 2010).

Desde el año 2000 estas cuatro empresas siguen estando en la vanguardia de la industria CAD y han ido integrando programas de otras compañías menores. Con la entrada en el tercer milenio los programas han ido ganando en especificidad, están más orientados al mundo de la arquitectura, el diseño industrial, o el diseño gráfico, entre otros. Todos ellos han ganado en sencillez y operatividad ya que, además, los procesadores han dado un salto de calidad y tanto las tarjetas de video como las memorias RAM son cada vez más veloces. Los últimos avances

significativos están en la línea de la compatibilidad entre paquetes de programas, los cuales permiten realizar más acciones sobre los modelos CAD, y la invención del BIM (Building Information Modelling) fundamentalmente en programas relacionados con la arquitectura.

Actualmente los programas CAD más enfocados al diseño industrial y con mayor difusión son (Bobylev, 2017): Catia (Dassault Systèmes), Solidworks (Dassault Systèmes), NX-Siemens (Siemens), SolidEdge (Siemens), AutoCAD (Autodesk), Inventor Professional (Autodesk), PTC Creo Elements (PTC), ArchiCAD (Graphisoft), Rhinoceros (Rhinoceros), KeyCreator (Kubotech 3D), y Sketchup Pro (Google).

Como se ha señalado anteriormente, cada programa tiene sus especificidades en cuanto al motor de modelado, el modo de definición de las superficies, diseño directo o paramétrico, etc... Llegados a este punto, es necesario preguntarse porqué se ha elegido Autodesk Inventor Professional para el presente trabajo, existiendo tantas otras herramientas perfectamente válidas para lograr los objetivos propuestos.

Autodesk Inventor Professional es un software CAD 3D utilizado principalmente para diseño, visualización y estudio de mecanismos. Los prototipos creados por este software permiten simular con precisión el peso, el estrés, las fricciones y cargas a las que están sometidos, presentando estos resultados sobre el propio modelo, por lo que su evaluación e interpretación es casi inmediata. Se permite diseñar desde modelos básicos hasta modelos complejos donde se ponen de manifiesto los conocimientos de ingeniería mecánica. Además, Autodesk Inventor Professional presenta un paquete de herramientas integrado que van desde un programa de animación de componentes (Inventor Studio) hasta los de análisis de tensión. Las características del software son la gestión integrada de datos, facilidad para la automatización del diseño, actualización automática del dibujo y vistas o la lista de materiales automática, entre otras. Todo este conjunto de herramientas integradas ayuda a modelar mientras se estudia el conjunto, de modo que, se reducen los errores y el tiempo de modelado, ya que es sencillo redimensionar y optimizar los elementos sin necesidad de tener terminado el conjunto. Estas características hacen de Autodesk Inventor Professional uno de los programas con mejor productividad y eficiencia.

Por otro lado, las personas que han trabajado con el software de dibujo AutoCAD (también de Autodesk), quizás el programa de dibujo de mayor difusión a nivel mundial, se encuentran un entorno de trabajo muy familiar. Así pues, los archivos dibujados en este programa, de extensión DWG, pueden ser directamente utilizados en Autodesk Inventor Professional como dibujos o, en su caso, como bocetos para construir modelos 3D. Pero también, para la creación de prototipos digitales es muy común integrar tanto las herramientas para obtener dibujos 2D de AutoCAD como las herramientas de diseño y análisis 3D de Autodesk Inventor Professional, lo que facilita la reconstrucción virtual del producto final. Por lo tanto, este programa ayuda al diseño y simulación sin necesidad de crear modelos físicos.

El éxito de Autodesk Inventor Professional a nivel comercial es una cuestión que está fuera de toda duda, ya que cuenta con una extensísima comunidad de usuarios. Existen multitud de lugares en Internet donde se comparten soluciones, bibliotecas de materiales o bancos de piezas. En los años 80, Autodesk consiguió imponer su sistema CAD (AutoCAD) llevando a los PC un software de alto nivel al 20% del precio que costaban el resto de programas. Hoy en día, Autodesk sigue con esa política de dar la mayor difusión a sus productos aun a costa de obtener un beneficio menor; de hecho, la compañía ofrece una versión estudiante para estudiantes, profesores y comunidad educativa, completamente gratuita y con prestaciones prácticamente similares a las de los programas profesionales.

2.2.2. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor Professional 2016

2.2.2.1. Trabajo sobre la planimetría original y estudio de la memoria

El primer paso a seguir dentro del estudio de los ingenios de Agustín de Betancourt y Molina es trabajar con el material de partida. El elemento más importante dentro de este trabajo es el plano o lámina. La mayor parte de los planos obtenidos desde el website de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia carecen de referencias directas que ayuden a determinar las dimensiones del objeto a estudiar, es decir, no presentan escala gráfica. Sin embargo, la acotación de los planos originales, como cabe suponer, tiene una trascendencia determinante para el resto del trabajo, por lo que es especialmente importante acertar con las dimensiones del mismo.

Por un lado, los planos suelen ir acompañados de anotaciones de dos tipos: explicativas, como la que aparece en la parte inferior izquierda del siguiente ejemplo (Figura 2.1), o directamente letras que señalan elementos. Por suerte, cuando los planos están anotados existe una memoria complementaria que puede dar alguna información más sobre las dimensiones del ingenio, pero no siempre es así, o puede ocurrir que en la memoria descriptiva no se haga referencia a las dimensiones de ningún elemento.

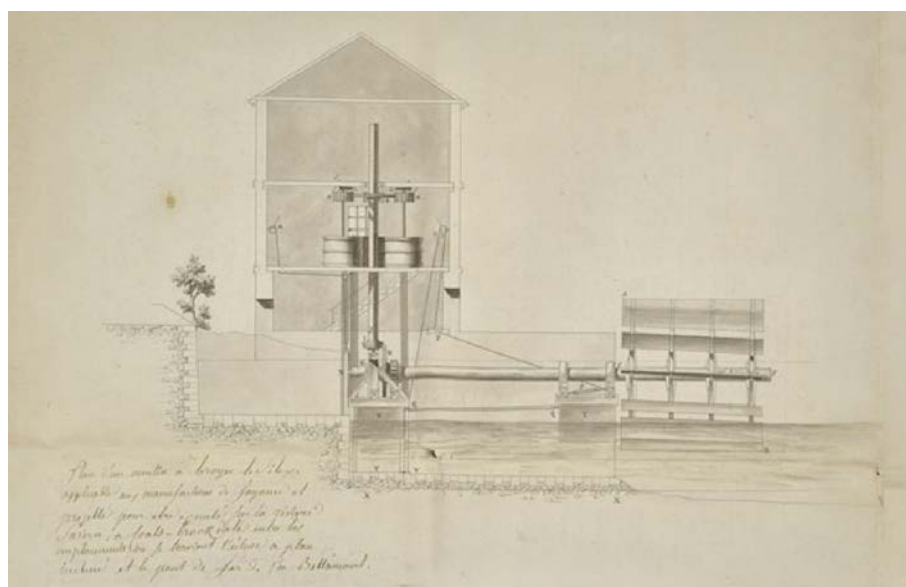


Figura 2.1. Plano original del molino de sílex (Betancourt y Molina, 1796b).

Por otro lado, Agustín de Betancourt y Molina era especialmente cuidadoso, como se ha comprobado a posteriori, en presentar hasta el detalle todos los elementos del ingenio (representa cimentaciones y muros con el exacto número de líneas de piedras que requiere). Esto es un elemento importante a la hora de elegir la escala del plano, ya que los elementos que Betancourt utiliza son frecuentemente conocidos, y se puede determinar su dimensión con un margen de error pequeño. En el caso del molino de sílex hay varios objetos que pueden ayudar a determinarlas. La primera planta de la construcción, donde se encuentran las piedras de moler (muelas), es la planta de trabajo, y por lo tanto los operarios podían andar de pie. Otra referencia más exacta está en las propias ruedas, ya que las ruedas francesas de moler eran de dimensiones conocidas, pues se exportaba a toda Europa. Este dato, más preciso que el primero, ha sido el elegido para dimensionar dicho plano. Una vez determinado un elemento, se toman otros como datos de control. La escala aproximada se contrasta con esos datos de control, las dimensiones de la escalera, de la ventana o la altura del piso. Si el resultado es coherente se toma la escala como válida, y si no es así, se buscan otros elementos que puedan resultar conocidos y proporcionados.

A juicio del autor de la tesis doctoral, Agustín de Betancourt y Molina no tenía intención con sus planos, de dar unas medidas determinadas a sus invenciones. Esto, que puede resultar algo extraño, no lo es si se tiene en cuenta que no existían, en la época, piezas normalizadas, ya que todo se hacía artesanalmente. El director de obra tenía una libertad grande para adaptar el modelo a las condiciones del río, y el ingeniero español no determina la localización exacta del río donde quiere ubicar el molino, lo que va a condicionar la geometría del canal de entrada y las dimensiones del eje principal de la rueda hidráulica.

En otros casos, como en la esclusa de émbolo buzo, Betancourt sí especifica las dimensiones del canal, la profundidad del foso y de otros elementos. Esto no es lo habitual, y de hecho esas dimensiones no vienen anotadas en las láminas del expediente de la esclusa.

Por otro lado, la memoria descriptiva suele ser importante para comprender el funcionamiento y las partes del ingenio. Algunos ingenios no son sencillos de comprender debido a la complejidad de sus mecanismos, y en dichas memorias se mencionan los elementos principales y se da razón del papel que juegan (Figura 2.2). De su estudio se tiene una visión más completa del mecanismo y su finalidad. Sin embargo, el estudio exclusivo del plano tiene un segundo inconveniente ya que el plano es como una instantánea del mecanismo, y por lo tanto, aparece en una única posición. La memoria indica cómo trabaja ayudando a entender en movimiento el ingenio.

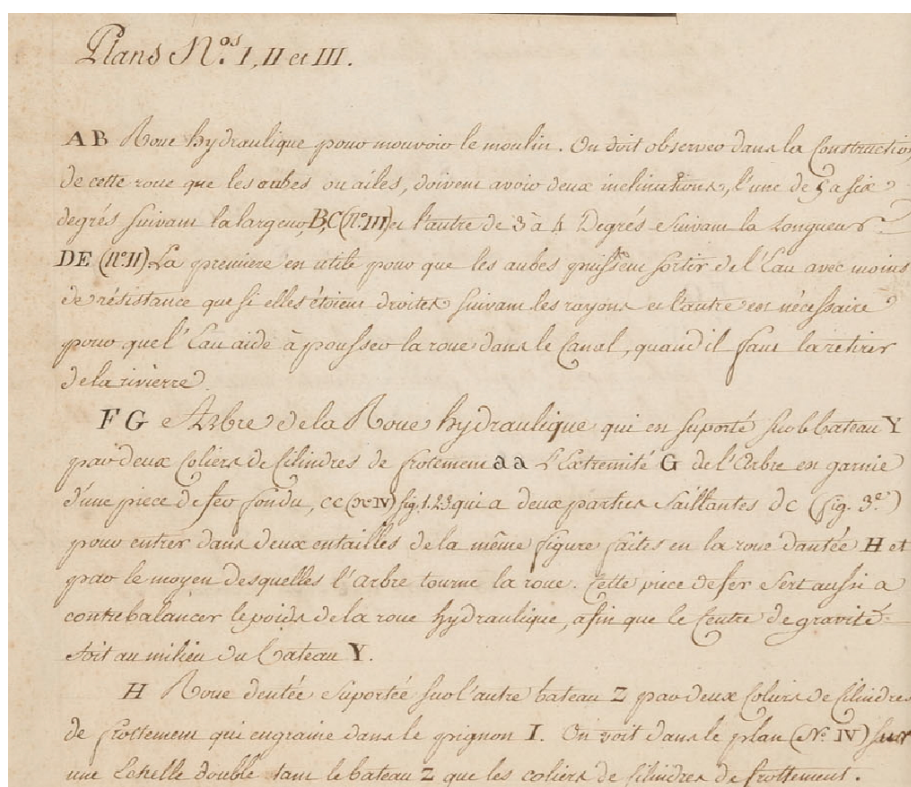


Figura 2.2. Manuscrito explicativo de las diferentes partes del molino de sílex (Betancourt y Molina, 1796b).

2.2.2.2. Modelado 3D de las piezas y ensamblaje del conjunto

El proceso de recreación del modelo 3D es uno de los pasos más delicados del estudio ya que es determinante para que la invención pueda estudiarse desde el punto de vista de la ingeniería. Por lo tanto, los pasos a seguir en este proceso deben tomarse con cautela y orden, ya que no en vano, es la primera aportación del presente trabajo al estudio de los ingenios.

Para el diseño de una pieza se comienza creando un nuevo archivo. Dentro del menú ‘Crear nuevo archivo’ de Autodesk Inventor Professional hay que pulsar el botón ‘Pieza Normal’, que es un archivo de extensión IPT (Figura 2.3).

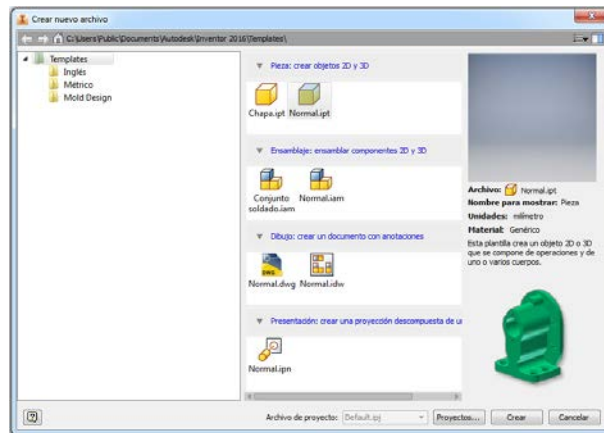


Figura 2.3. Menú ‘Crear nuevo archivo’.

Al crear un nuevo archivo se abre una pantalla en blanco con un gran menú de acciones desplegado en forma de barra de herramientas en la parte superior de la ventana de trabajo. Por otro lado, a la izquierda aparece el árbol de operaciones de la pieza que se quiere construir, como se puede apreciar en la Figura 2.4.

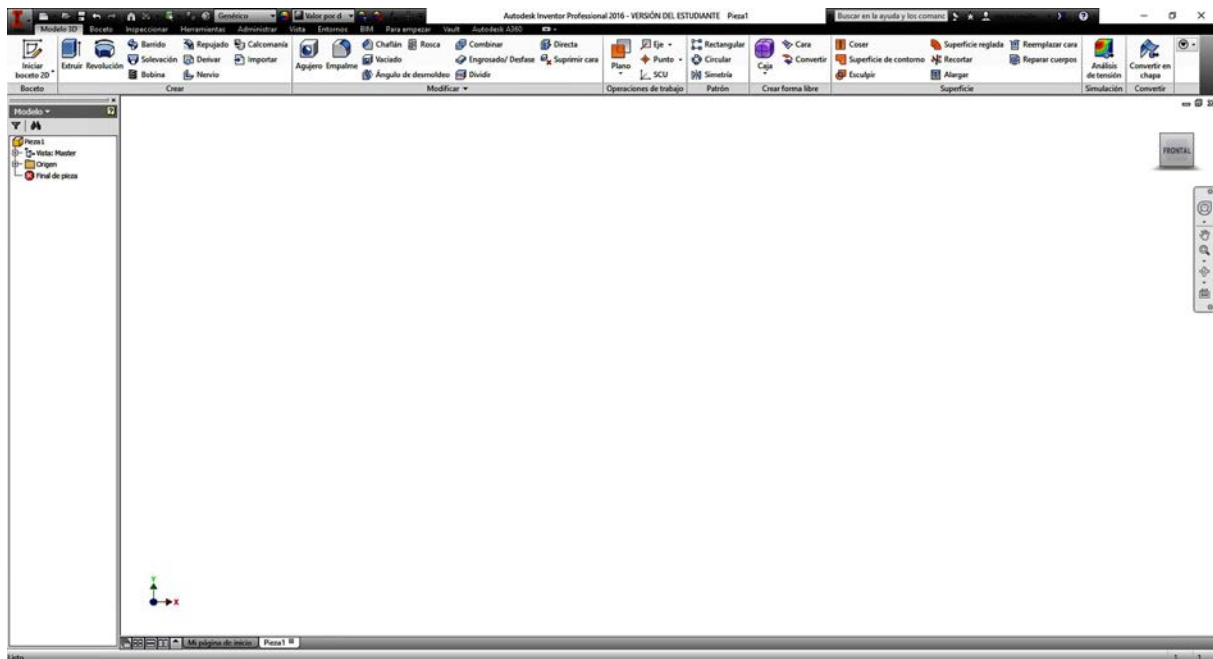


Figura 2.4. Entorno de trabajo para el proceso de modelado 3D.

Así pues, una vez conocido el entorno de trabajo, para crear una pieza es conveniente crear un boceto de la misma en 2D a partir de la cual se dará volumen. Se puede dibujar directamente en 3D, pero esta opción puede dar problemas. Al ser un programa paramétrico y si después se requiere cambiar las dimensiones de una pieza, acudir al boceto original es conveniente.

Tras pulsar el botón ‘Iniciar boceto 2D’ dentro del submenú ‘Boceto’, el programa pide elegir uno de los 3 planos de trabajo (XY, XZ o YZ) para realizar el boceto (Figura 2.5). Posteriormente, en el proceso de modelado los bocetos se pueden realizar en cualquier plano de la pieza o en otros auxiliares.

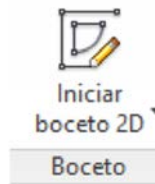


Figura 2.5. Botón 'Iniciar boceto 2D'.

Al elegir el plano de trabajo se despliega el menú para trabajar el boceto (Figura 2.6). Para usuarios familiarizados con el entorno de AutoCAD las herramientas para trabajar el boceto en 2D resultan muy familiares.

Dentro del submenú 'Crear', se permite crear multitud de elementos geométricos a partir de sus parámetros fundamentales. Estos parámetros se pueden referenciar a otros elementos o pueden ser introducidos posicionalmente. Creadas las figuras geométricas iniciales sobre las que se quiere plantear el boceto, el submenú 'Restringir' suele ser muy útil. Este submenú relaciona y establece ciertas propiedades de unas geometrías respecto a otras, lo que ayuda a dibujar los bocetos con mayor precisión y velocidad, ya que se prescinde de referencias a puntos que encorsetan los bocetos y después dificultan o imposibilitan las propiedades del software paramétrico. Dispuestas las figuras y restringidas sus posiciones, el submenú 'Modificar' puede ayudar a completar el boceto. Si se quiere copiar el patrón del boceto de alguna forma se puede acudir al submenú 'Patrón'.



Figura 2.6. Menú 'Boceto'.

La Figura 2.7 muestra el boceto de una pieza rectangular que alberga una superficie ovalada en su interior. Las cotas muestran las restricciones dimensionales. Asimismo, los bocetos pueden alcanzar un nivel de complejidad acorde a la que tiene de la pieza, pero evidentemente hay más de una forma de dibujar la misma pieza.

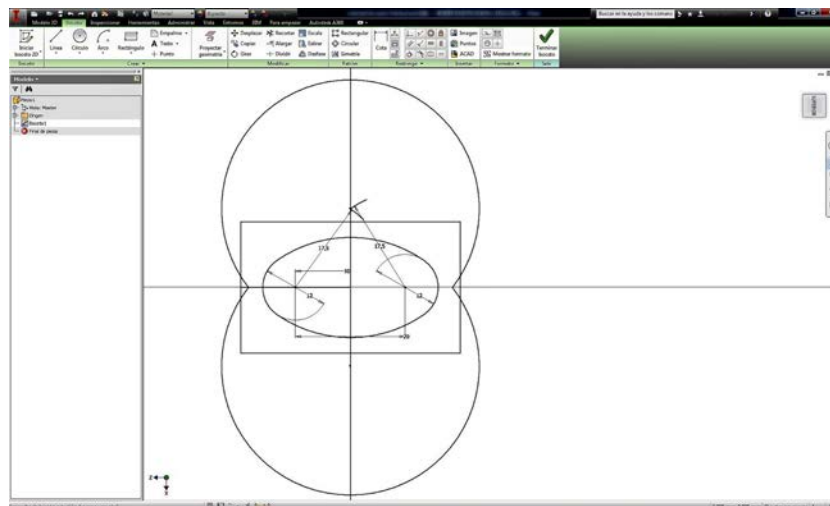


Figura 2.7. Pantalla de Boceto.

Concluidas las operaciones sobre el boceto se pulsa el botón 'Terminar boceto' del submenú 'Salir'. Inmediatamente se vuelve a la pantalla general para el diseño 3D. El siguiente paso es darle volumen a la pieza y para ello, en el submenú 'Crear' se permiten diferentes opciones sobre el boceto (Figura 2.8). Las opciones más usadas suelen ser 'Extruir' y 'Revolución'.

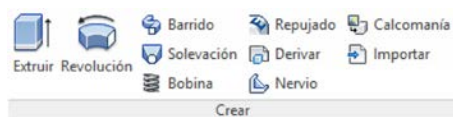


Figura 2.8. Submenú 'Crear'.

Sobre el ejemplo mostrado en la Figura 2.7 se ha practicado una extrusión. Al pulsar el botón "Extruir" se activa un menú flotante sobre la ventana de trabajo. Así pues, se selecciona la superficie que se quiere extruir, y se eligen las operaciones que se quieren efectuar: distancia de la extrusión, si es macizo o vacío y sentido de la extrusión (en la dirección normal a la superficie). Para el resto de botones del submenú 'Crear', Autodesk Inventor Professional también dispone de un menú dinámico similar al presentado en la extrusión (Figura 2.9).

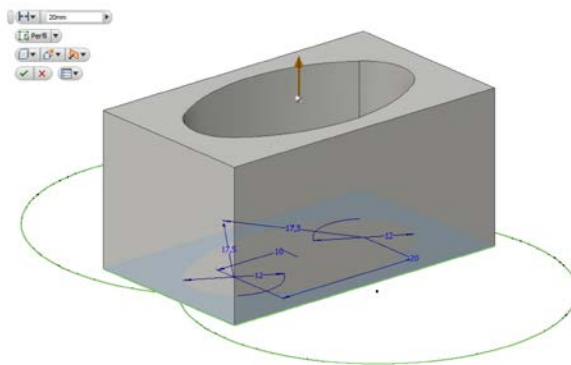


Figura 2.9. Menú flotante de la operación 'Extruir'.

La pieza obtenida por extrusión puede ser el punto de partida de otras operaciones o nuevos bocetos. También puede crearse un plano nuevo sobre el que empezar a trabajar otro boceto utilizando el submenú 'Operaciones de trabajo' (Figura 2.10). Por otra parte, sobre la pieza se puede practicar acciones encaminadas a modificar su geometría. El submenú 'Modificar' da diferentes opciones para modificar la pieza extruida (Figura 2.11).

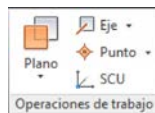


Figura 2.10. Submenú 'Operaciones de trabajo'.

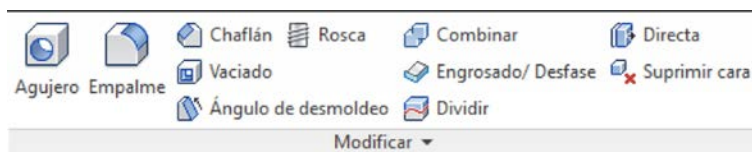


Figura 2.11. Submenú 'Modificar'.

En la Figura 2.12 se puede ver un ejemplo de acción sobre la pieza extruida. En este caso se han practicado unos agujeros enroscados sobre la pieza para que acoplen perfectamente con un tornillo de características determinadas. Cada una de las opciones del submenú 'Modificar' despliega a su vez un cuadro de diálogo en el que se pueden configurar las características de la acción que se quiere realizar sobre la pieza.

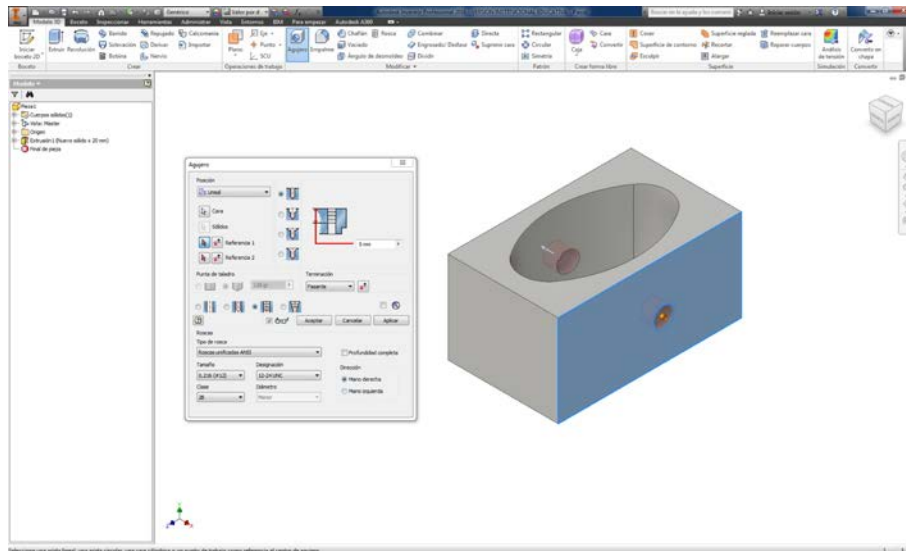


Figura 2.12. Cuadro de diálogo 'Agujero'.

Como ocurriría con el boceto, a veces es necesario repetir una operación, copiar una pieza o una parte de ella. Para ello también existe un submenú 'Patrón' que permite repetir múltiples veces la misma acción en determinados lugares ateniendo a una retícula, a un patrón circular o a un eje de simetría (Figura 2.13).

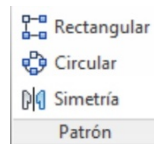


Figura 2.13. Submenú 'Patrón'.

En la Figura 2.14 se puede ver el uso de un patrón rectangular para copiar la operación agujero en la pieza. El menú que se despliega permite editar ese patrón para ajustarlo a las características deseadas por el usuario.

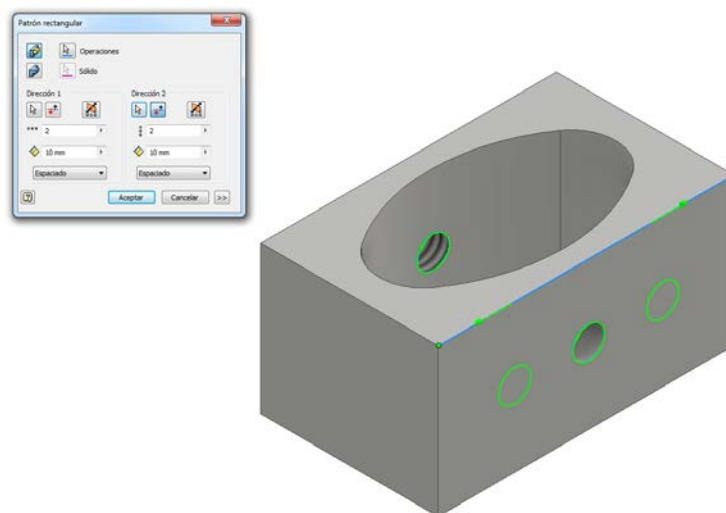


Figura 2.14. Ejemplo de patrón rectangular.

Por último, existe todavía la posibilidad de crear en la pieza superficies sin volúmenes, para ello el submenú 'Superficie' da cabida a varias posibilidades (Figura 2.15). Este tipo de estructuras es problemático ya que se forman como una chapa, por lo que hay que tenerlo en cuenta a la hora de usar estas herramientas. Existe la posibilidad de reparar esta carencia como más adelante se comentará dentro de las posibilidades que ofrecen los ensamblajes.

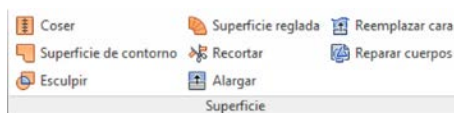


Figura 2.15. Submenú 'Superficies'.

Terminadas de diseñar las piezas, llega el momento de efectuar el ensamblaje. En esta segunda fase se definen la relación entre las piezas, sus contactos y los patrones que van a definir el comportamiento del conjunto como un único mecanismo, considerando especialmente la geometría de cada pieza. Para comenzar el ensamblaje hay que entrar en el menú 'Crear nuevo archivo' y elegir la opción 'Ensamblaje Normal', archivo de extensión IAM (Figura 2.16)

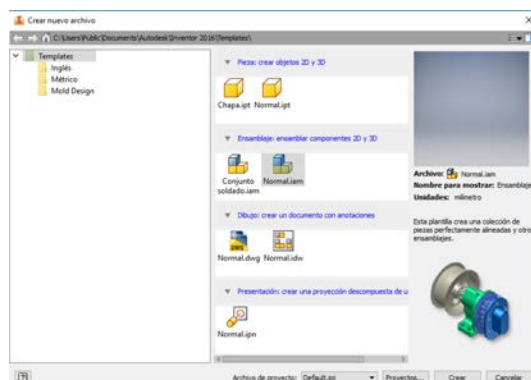


Figura 2.16. Menú 'Crear nuevo archivo'. Ensamblaje.

Una vez en la pantalla del ensamblaje se despliega la barra de herramientas del menú 'Ensamblar' (Figura 2.17). La primera acción que hay que llevar a cabo es introducir las piezas que se quieren ensamblar, y para ello es aconsejable hacerlo siguiendo los pasos del montaje de la pieza, lo que ayuda a comprender también cómo se pasaba del plano a la ejecución del mecanismo. Para introducir las piezas se elige el submenú 'Componente' (Figura 2.18) y se pulsa el botón 'Insertar'. Esta opción abre el administrador de archivos donde se buscan los archivos de extensión IPT que forman parte del mecanismo.



Figura 2.17. Menú 'Ensamblar'.



Figura 2.18. Submenú 'Componente'.

Importada la pieza a la pantalla de ensamblaje, es aconsejable situarla y orientarla en la posición y lugar donde se quiere que trabaje. La situación de la pieza se establece con un sencillo 'click' al abrirla, pero la orientación no siempre es la deseada. La pieza aparece orientada respecto a los ejes que definimos en su propio archivo, por lo que con frecuencia, al importarla no coinciden con los del ensamblaje. Para rotarlo y posicionarlo con libertad se utilizan los botones del menú 'Posición' (Figura 2.19).



Figura 2.19. Submenú 'Posición'.

El siguiente paso es el más importante del proceso. Dentro del submenú 'Relaciones' se pueden definir la relación entre componentes de dos modos: como una unión o como un obstáculo entre sus geometrías. Para elegir una u otra hay que seleccionar el botón correspondiente en dicho submenú (Figura 2.20).

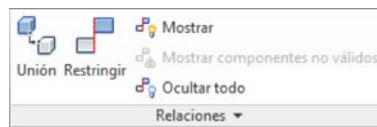


Figura 2.20. Submenú 'Relaciones'.

Las uniones se pueden definir de distintos modos atendiendo al tipo de geometría que se establece entre las piezas (Figura 2.21). Elegido el tipo de unión, aparece en la pantalla de ensamblaje, un menú dinámico que ayuda a visualizar el contacto y a terminar de definirlo correctamente (Figura 2.22).

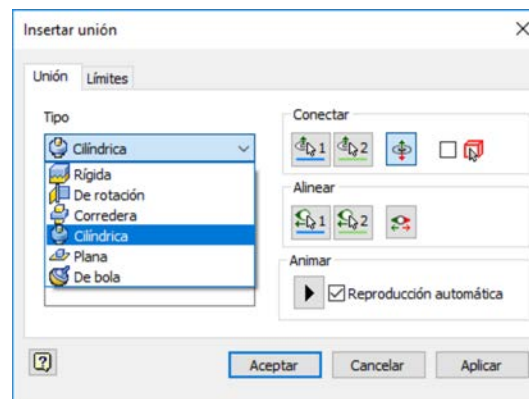


Figura 2.21. Cuadro de diálogo 'Insertar unión'.

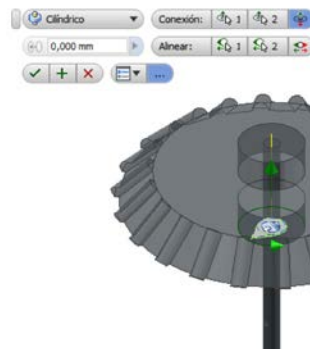


Figura 2.22. Menú dinámico para editar el contacto entre piezas.

Si el contacto entre piezas no es una unión se deben definir sus restricciones. Al pulsar el botón 'Restringir' del submenú 'Relaciones', se abre una ventana para editar esta relación. Fundamentalmente se definen cuatro tipos de restricciones: de ensamblaje, de movimiento, transicional y compleja (conjunto de restricciones). Dentro del tipo ensamblaje se pueden definir por oposición de caras, ángulo entre caras, caras tangentes, por agujero o por simetría (Figura 2.23). Este tipo de restricciones suele ser el más común. En cualquier caso, tras elegir el tipo de restricción, hay que seleccionar las caras donde se define. El programa no permite la restricción si geoméricamente hay incompatibilidades o si otra restricción previa lo impide. Debido a esto, si el ensamblaje es muy complejo, suele ser conveniente ver las restricciones que se han definido; en el menú relaciones se puede pulsar el botón 'Mostrar' (Figura 2.20). La restricción también aparece reflejada en el árbol de operaciones dentro de la carpeta de cada pieza.

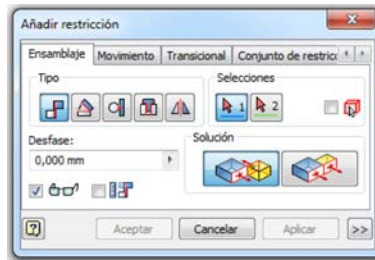


Figura 2.23. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Ensamblaje'.

Otro tipo de restricción es la que provoca un movimiento, como la que se establece entre los engranajes. Lo primero que se define en estas restricciones es si se da entre dos elementos giratorios o entre un movimiento giratorio y otro tangencial. En ambos casos hay que definir la relación entre movimientos. En la Figura 2.24 aparece un cuadro de diálogo con la opción de 'Relación', en la que se escribe el número de vueltas que da el segundo elemento seleccionado cuando el primer elemento seleccionado da una vuelta. De manera análoga si el movimiento es tangencial, hay que definir cuantos mm avanza por cada vuelta que da el elemento circular. Por último, también se define si ambos elementos giran en la misma dirección o en sentidos opuestos.

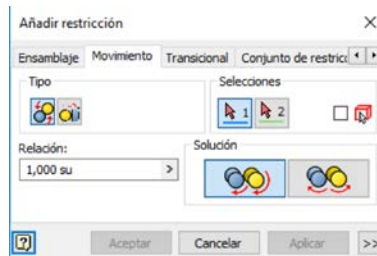


Figura 2.24. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Movimiento'.

La restricción transicional hace referencia a objetos cilíndricos que se desplazan por una leva o ranura con distinta geometría, tomándose como primera referencia la cara circular que rota sobre la geometría plana que es la segunda referencia (Figura 2.25).

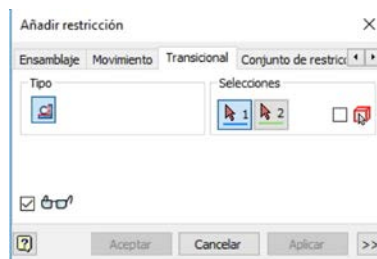


Figura 2.25. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Transicional'.

La restricción compleja (conjunto de restricciones), restringe el sistema de coordenadas de un objeto respecto al sistema de coordenadas de un segundo objeto. Para ello, primero hay que definir un objeto SCU (por su sistema de coordenadas). Esta restricción se utiliza en geometrías especialmente complejas (Figura 2.26).

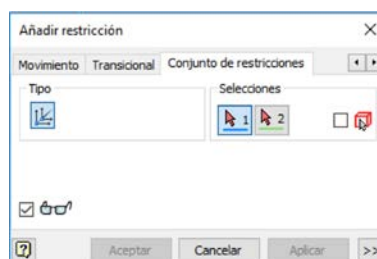


Figura 2.26. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Conjunto de restricciones'.

Terminadas de definir las restricciones de las piezas del ensamblaje caben varias opciones. Una primera, puede pasar por simplificar el ensamblaje. Esta opción no es muy conveniente, pues, al transformar el ensamblaje en un conjunto simplificado, el ensamblaje pierde algunas de sus propiedades originales. Sin embargo, cuando la maquinaria a estudiar es especialmente compleja y tiene un gran número de componentes, se puede plantear su uso (Figura 2.27).

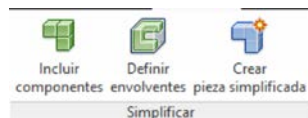


Figura 2.27. Submenú 'Simplificar'.

Por último, la pantalla de ensamblaje dispone de un menú 'Diseño' que sirve para introducir en el ensamblaje objetos ya creados pertenecientes a la biblioteca de Autodesk Inventor Professional (Figura 2.28). Cada vez que se quiere introducir alguno de estos elementos, se abre un cuadro de diálogo como el mostrado en la Figura 2.29, en el que se pueden editar sus características. En todos ellos se plantea la cuestión de la posición en la que se quiere introducir el elemento, y permite la opción de concretar los complementos y características, atendiendo a la disponibilidad de materiales de dicha biblioteca. Las características estructurales del elemento a introducir también se muestran para que el usuario se pueda hacer una idea aproximada de si ha dimensionado bien al elegirlo.



Figura 2.28. Menú 'Diseño'.

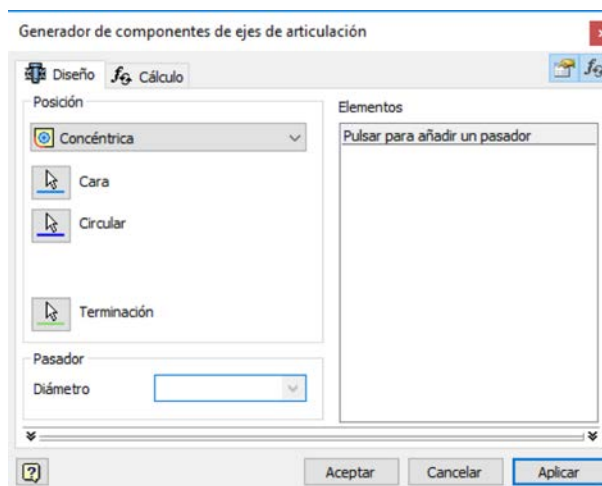


Figura 2.29. Cuadro de diálogo 'Generador de componentes de ejes de articulación'.

2.2.2.3. Creación de planos de detalle y de conjunto

Uno de los objetivos de la tesis doctoral es modelizar a escala las invenciones históricas analizadas, por lo que ha sido conveniente obtener los planos de detalle que complementen los planos originales. No es el momento de detenerse más sobre el concepto de plano que se tenía en la época, pero hoy día dichos planos no servirían para fabricar los ingenios. Debido a esto se ha querido también suplir esta carencia, ya que Autodesk Inventor Professional permite realizar planos de detalle perfectamente acotados y con simbología adecuada para definir cada una de los componentes facilitando la comprensión del conjunto ensamblado.

Así pues, para la creación de planos es necesario abrir un documento nuevo del tipo 'Dibujo Normal' con extensión IDW (Figura 2.30).

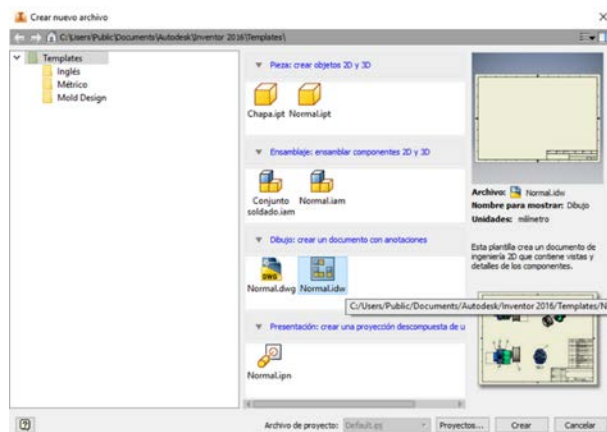


Figura 2.30. Menú 'Crear nuevo archivo'. Dibujo.

Al crearse el plano aparece con un cuadro de rotulación y unos bordes por defecto que se pueden modificar si pulsamos con el botón derecho del ratón la 'Hoja' en el árbol de operaciones y se elige la opción 'Editar'. Así pues, aparece un cuadro de diálogo (Figura 2.31) en el que se pueden cambiar las dimensiones de la hoja, su orientación y la posición del cuadro de rotulación.

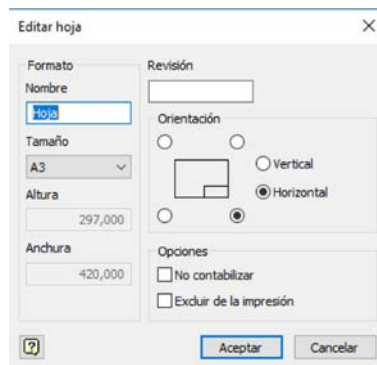


Figura 2.31. Cuadro de diálogo 'Editar hoja'.

Una vez elegidas las dimensiones del formato (A3), éste aparece vacío con los datos del plano en el cuadro de rotulación (Figura 2.32). De manera similar al paso anterior, se podrían cambiar las características del cuadro de rotulación cambiando sus dimensiones y los aspectos que se quiere remarcar en la hoja. Para cambiar el texto de los cuadros de rotulación, es necesario hacerlo en las propiedades del ensamblaje o piezas que se quieren mostrar.

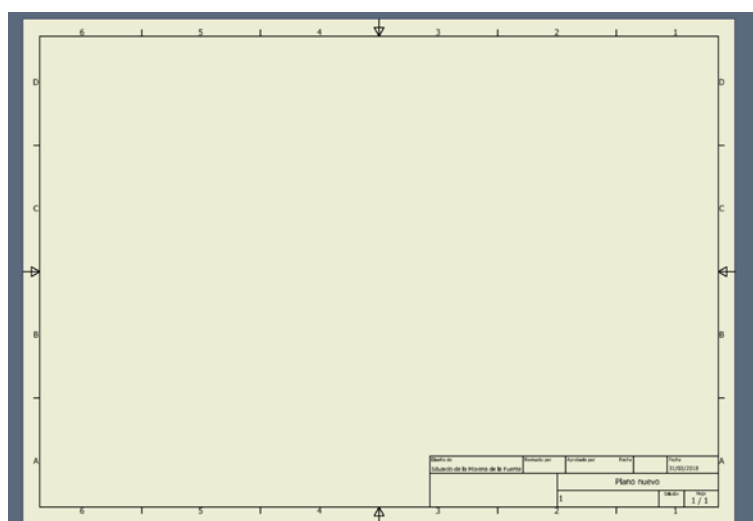


Figura 2.32. Formato A3 con cuadro de rotulación.

Tras cerciorarse de que los datos del cuadro de rotulación son correctos, hay que importar la pieza o ensamblaje y elegir la vista o vistas que se quieren mostrar. Para ello, hay que acceder a la pestaña 'Insertar vistas' del submenú 'Crear' y pulsar el botón 'Base', de manera que, cualquier otra operación, pasa por esta inicial (Figura 2.33).



Figura 2.33. Menú 'Crear'. Pestaña 'Insertar vistas'.

Al pulsar el botón 'Base', se abre un cuadro de diálogo en el que se pide el archivo donde está guardada la pieza o ensamblaje (Figura 2.34). En este cuadro se puede elegir la escala a la que se quiere representar el objeto y el estilo visual (con o sin color, vista renderizada, aristas ocultas o vista de "alambres").

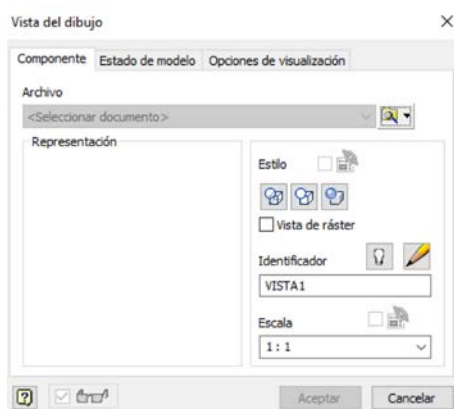


Figura 2.34. Cuadro de diálogo 'Vista del dibujo'.

Completado el cuadro de diálogo, hay que fijarse en la vista que se está representando en el formato. Se designa la vista o la perspectiva elegida, y se puede incluir alguna proyección más o vista auxiliar para completar el plano (Figura 2.35).

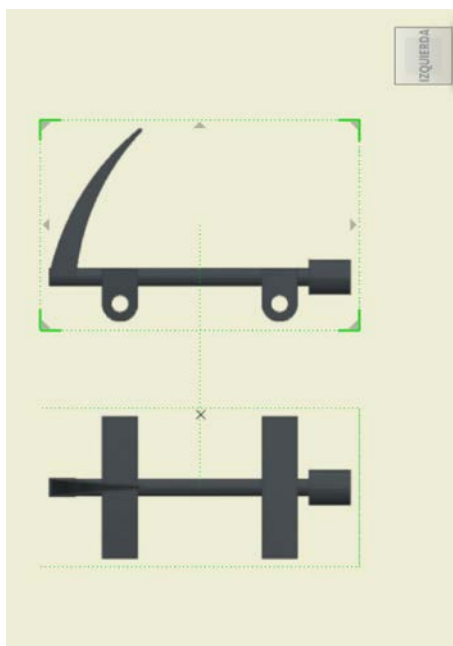


Figura 2.35. Vistas de alzado y planta superior de una pieza.

Una vez seleccionadas las vistas, Autodesk Inventor Professional representa las vistas elegidas a la escala deseada y con las características visuales anteriormente elegidas. Una vez representadas, se pueden separar las vistas a una distancia arbitraria (Figura 2.36).

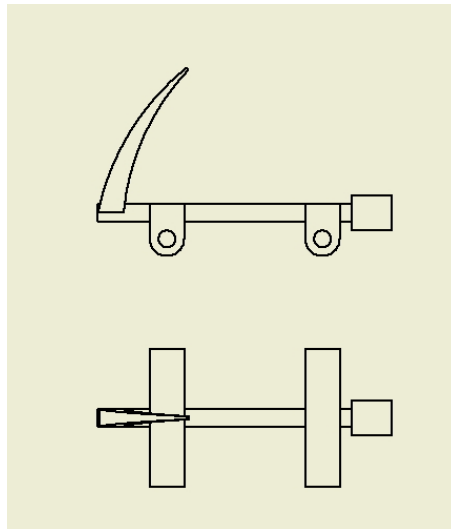


Figura 2.36. Vistas de la pieza con el estilo de visualización elegido.

Terminado el proceso de obtener las vistas y establecer su posición en el formato, llega el momento de la acotación de la pieza. Autodesk Inventor Professional tiene un submenú 'Cota' muy completo que permite acotar según una norma estandarizada. Un primer paso para evitar un excesivo trabajo en piezas complejas es pulsar el botón 'Recuperar' de dicho submenú (Figura 2.37), para mostrar las cotas automáticamente tratando a la vista de la pieza como un boceto. Así pues, de las cotas mostradas se eligen las que se quieren visualizar en el dibujo, aunque de esta forma, no se realiza ningún proceso de acotación completo ni ordenado. Para ello, es necesario elegir del mismo submenú el botón 'Cota', activando las referencias a puntos y aristas de la vista y permitiendo acotar detalladamente.

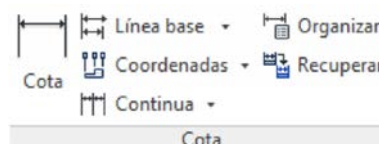


Figura 2.37. Submenú 'Cota'.

Al pulsar dicho botón, se eligen los extremos de la línea auxiliar de cota y se abre el cuadro de diálogo para la edición de los números de cota, introducción de textos y de símbolos adecuados a la norma (Figura 2.38). Por otra parte, la pestaña 'Precisión y tolerancia' de dicho cuadro de diálogo, permite dar las dimensiones con mayor o menor precisión utilizando un mayor número de decimales (Figura 2.39).

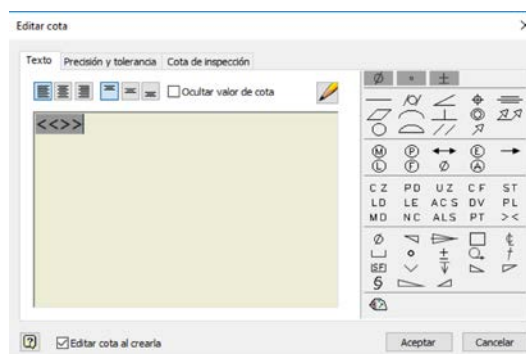


Figura 2.38. Cuadro de diálogo 'Editar cota'. Pestaña 'Texto'.

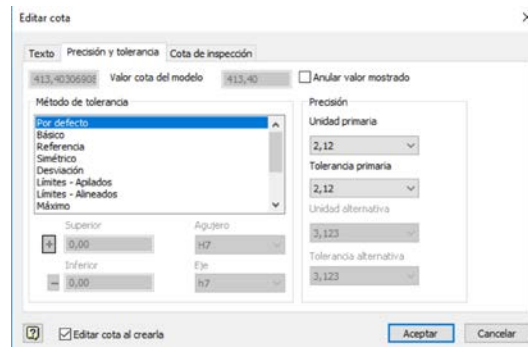


Figura 2.39. Cuadro de diálogo 'Editar cota'. Pestaña 'Precisión y tolerancia'.

En la Figura 2.40 se observa el ejemplo anterior con la pieza parcialmente acotada, pues faltan cotas y éstas no están alineadas. Para alinear y ajustar la acotación se puede recurrir al botón 'Organizar' dentro del submenú 'Cota'. De este modo, las cotas se alinean según se hayan definido las líneas de base y el tipo de acotación (línea base, coordenadas o continua).

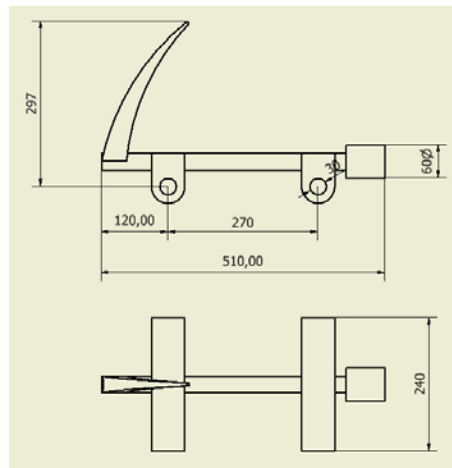


Figura 2.40. Pieza parcialmente acotada.

Otras operaciones adicionales figuran en el submenú 'Notas de operaciones', como son el dibujo de agujero y rosca, chaflán, punzonado o doblez (Figura 2.41).

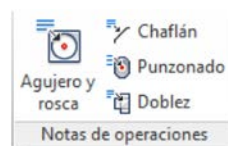


Figura 2.41. Submenú 'Notas de operaciones'.

Por último, en la acotación también es posible señalar ejes de simetría o centros de arcos, utilizándose para ello los botones de la Figura 2.42.

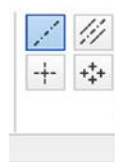


Figura 2.42. Tipología de símbolos secundarios para la acotación (ejes y simetrías).

Terminadas estas operaciones se observa el resultado deseado (Figura 2.43). Es importante precisar que Autodesk Inventor Professional no conoce la norma pertinente en cada país y, por lo tanto, es responsabilidad del autor del plano ajustarse a dicha norma y utilizar con corrección

todos los elementos (símbolos, cotas, líneas auxiliares, etc.). En el plano final pueden incluirse más piezas, no siempre acotadas del mismo modo, e incluso pueden presentar otras vistas, cortes o detalles constructivos (Figura 2.44).

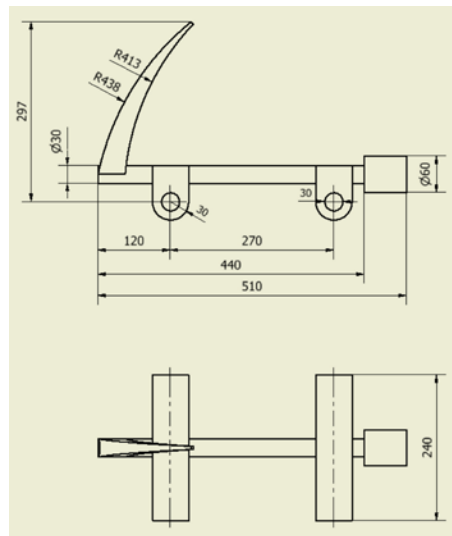


Figura 2.43. Pieza acotada completamente.

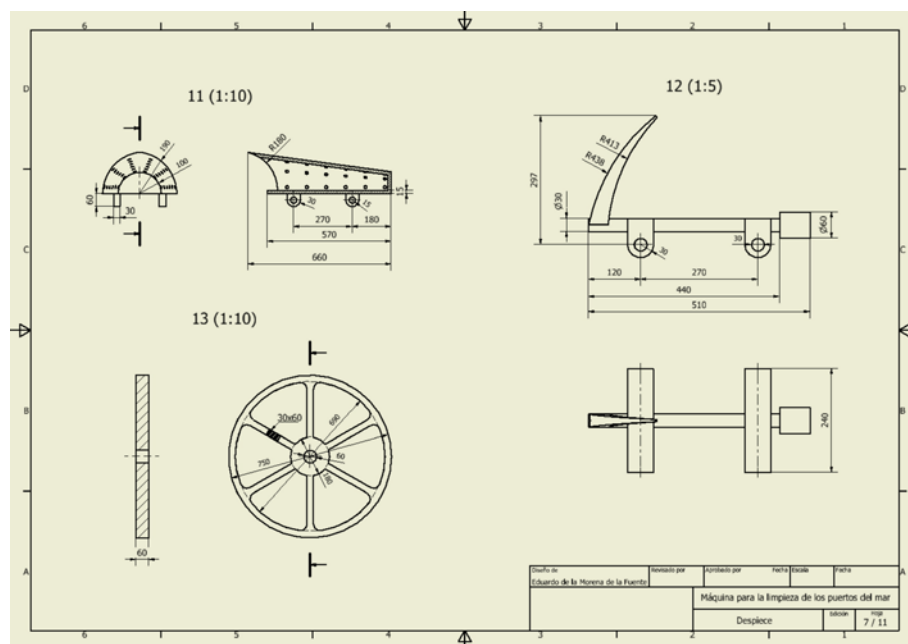


Figura 2.44. Ejemplo de plano de detalle.

Por otro lado, también es deseable un plano general donde se muestre el conjunto del ensamblaje con sus piezas. Este tipo de plano necesita de una tabla de elementos (lista de marcas) y referencias a cada una de ellas. Para obtener dicho plano, y tras elegir una vista que presente con claridad el ensamblaje, es necesario acceder al submenú 'Tabla' (Figura 2.45). La gama de opciones que proporciona el menú de tipos de tabla es amplia, pudiendo ser de piezas, de agujeros, de materiales y características, o una más general.

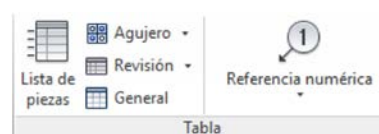


Figura 2.45. Submenú 'Tabla'.

Si se elige el botón 'Lista de piezas', se despliega un cuadro de diálogo que permite seleccionar las piezas que se quieren nombrar sobre la vista que se ha representado en el plano (Figura 2.46). Además, se puede definir la tabla y la posición donde se quiere que aparezca, aunque después se retoquen las propiedades de la tabla en el árbol de operaciones.

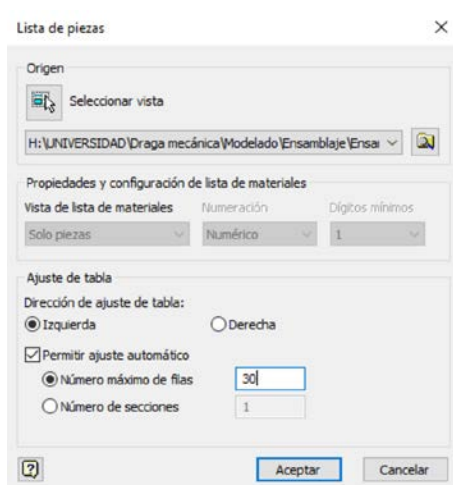


Figura 2.46. Cuadro de diálogo 'Lista de piezas'.

Si se pulsa el botón 'General' del submenú 'Tabla' se puede importar una tabla de Excel con extensión XLS, que no tiene por qué estar necesariamente vinculada a la vista representada, siendo esta opción más sencilla si el ensamblaje tiene un excesivo número de piezas. Terminada de definir la tabla se establecen las referencias numéricas de las piezas del ensamblaje. Autodesk Inventor Professional permite hacer un referenciado automático de piezas utilizando la opción 'Referencia numérica automática'. El botón 'Referencia numérica' es la opción manual para establecer las referencias a las piezas y, a veces, puede ser más efectivo que la referencia numérica automática (Figura 2.47).

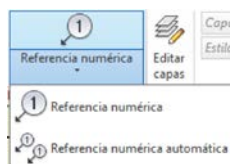


Figura 2.47. Botón para insertar las referencias numéricas a cada elemento.

Para configurar la referencia automática se abre un cuadro de diálogo en el que se pueden señalar o eliminar los componentes que se quieren referenciar, configurando un espaciado por defecto y pudiendo señalar la dirección de la flecha de la referencia. Por último, se puede cambiar el estilo de símbolo de referencia por si es necesario ajustarse a alguna norma (Figura 2.48).

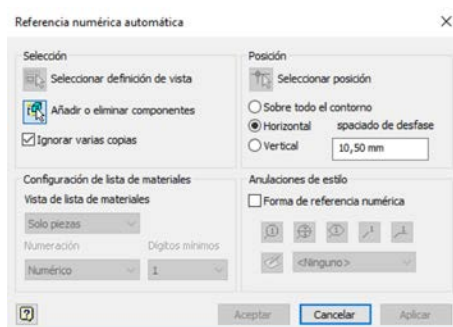


Figura 2.48. Cuadro de diálogo 'Referencia numérica automática'.

El resultado final (Figura 2.49) es un plano de conjunto que proporciona una visión general del ensamblaje mostrando cada elemento. Este tipo de planos ayuda a describir el mecanismo y su funcionamiento, por lo que se ha utilizado en todas las invenciones analizadas. Es importante, por otro lado, evitar listas de marcas excesivas, ya que se puede perder la finalidad para la que está concebida, siendo aconsejable en dicho caso, acudir a subconjuntos.

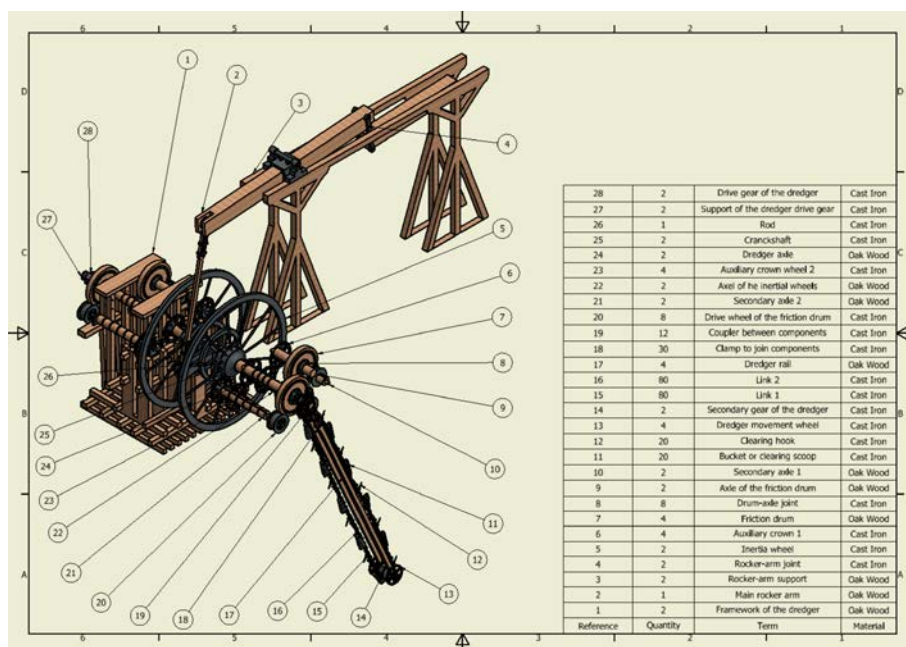


Figura 2.49. Plano de conjunto de un ensamblaje con indicación de sus elementos y lista de marcas.

2.2.2.4. Creación de perspectivas estalladas

Autodesk Inventor Professional facilita los recursos necesarios para representar la perspectiva estallada de cualquier mecanismo. Este tipo de vista facilita la comprensión del montaje del ingenio, pero además aporta un motor de animación que sirve para hacer más patente este montaje. Como uno de los objetivos de la presente investigación es mostrar no sólo el modelo sino el montaje de cada invención, esta herramienta va a tener un papel fundamental para la comprensión completa de cada ingenio.

Para acceder a esta herramienta, dentro del menú 'Crear nuevo archivo' hay que acceder a la opción de 'Presentación Normal' (Figura 2.50) con extensión IPN.

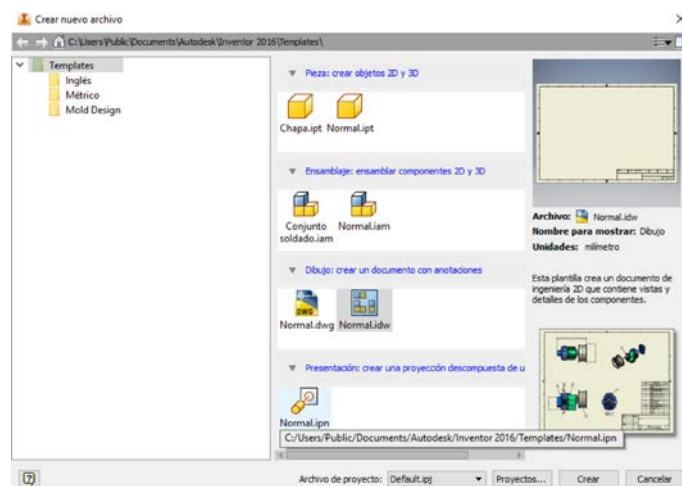


Figura 2.50. Menú 'Crear nuevo archivo'. Presentación.

Una vez en el menú 'Presentación' y en el submenú 'Crear' hay que pulsar el botón "Crear vista" (Figura 2.51).

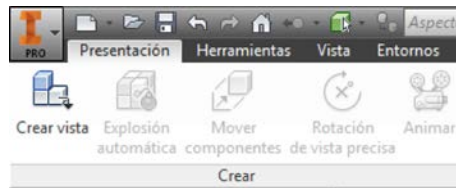


Figura 2.51. Menú 'Crear'.

Al pulsar dicho botón se despliega un cuadro de diálogo en el que se nos pide seleccionar el ensamblaje objeto de la vista (Figura 2.52). El software facilita además una explosión automática del mecanismo, aunque sólo distingue las partes del ensamblaje, por lo que para realizar ulteriores especificaciones hay que realizar movimientos manuales de dicha perspectiva. Además, Autodesk Inventor Professional permite determinar la distancia a la que se quiere separar los componentes, y si se quiere realizar más de un nivel de explosión. Finalmente, se puede configurar la trayectoria del montaje en una o varias direcciones.

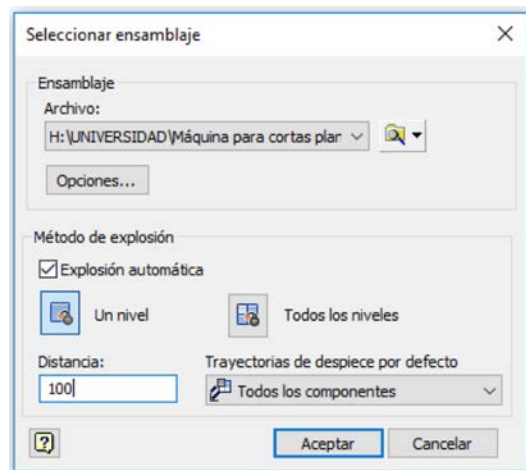


Figura 2.52. Cuadro de diálogo 'Seleccionar ensamblaje'.

Tanto si se realiza un despiece automático como si no se hace este despiece previo, será necesario mover algunos componentes manualmente para ajustar la perspectiva estallada a voluntad. Para ello, se pulsa el botón 'Mover componentes' (Figura 2.53) e inmediatamente se despliega un menú dinámico sobre la vista, eligiéndose el elemento que se desea mover. Elegido el elemento, se elige la dirección del movimiento y se especifica la distancia a recorrer. El menú flotante permite además girar el elemento, agregar más elementos al movimiento y señalar la línea de trayectoria seguida (Figura 2.54).



Figura 2.53. Botón para mover los componentes automáticamente.

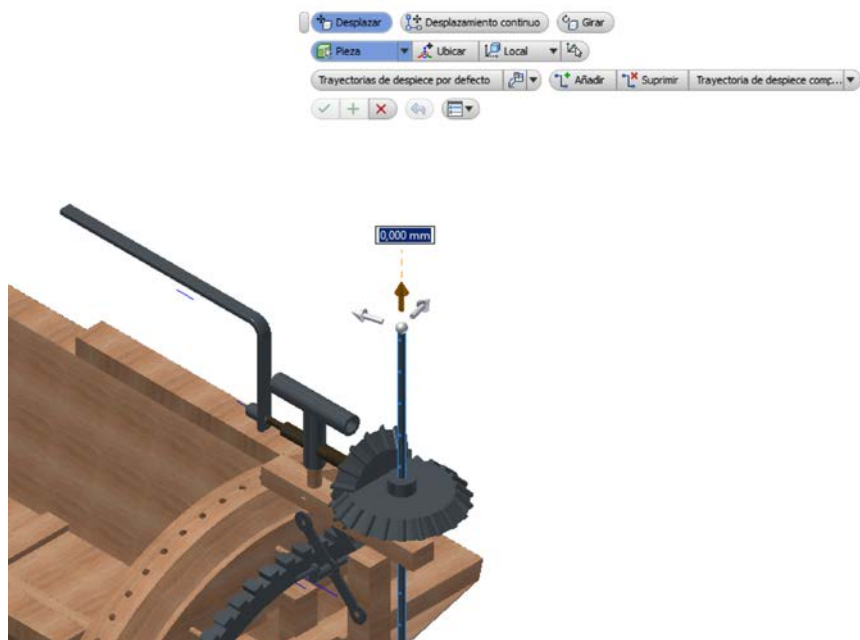


Figura 2.54. Menú dinámico para la definición de la trayectoria y la distancia de cada componente.

El resultado de la perspectiva estallada debe ser lo suficientemente claro para que se distingan los elementos y para que se muestren la relación entre ellos; por ello, la separación entre elementos debe ser moderada (Figura 2.55). Al llegar a este punto se plantea una doble alternativa, animar la perspectiva estallada utilizando una versión simplificada de Autodesk Inventor Studio a la que se accede con el botón 'Animar' de la barra de herramientas, o abrir la perspectiva estallada como un dibujo para su representación en un plano. Esta segunda opción permite modificar las líneas de trayectoria para dar lugar a líneas de trazo y punto que presenten con mayor claridad el montaje del ensamblaje (Figura 2.56).

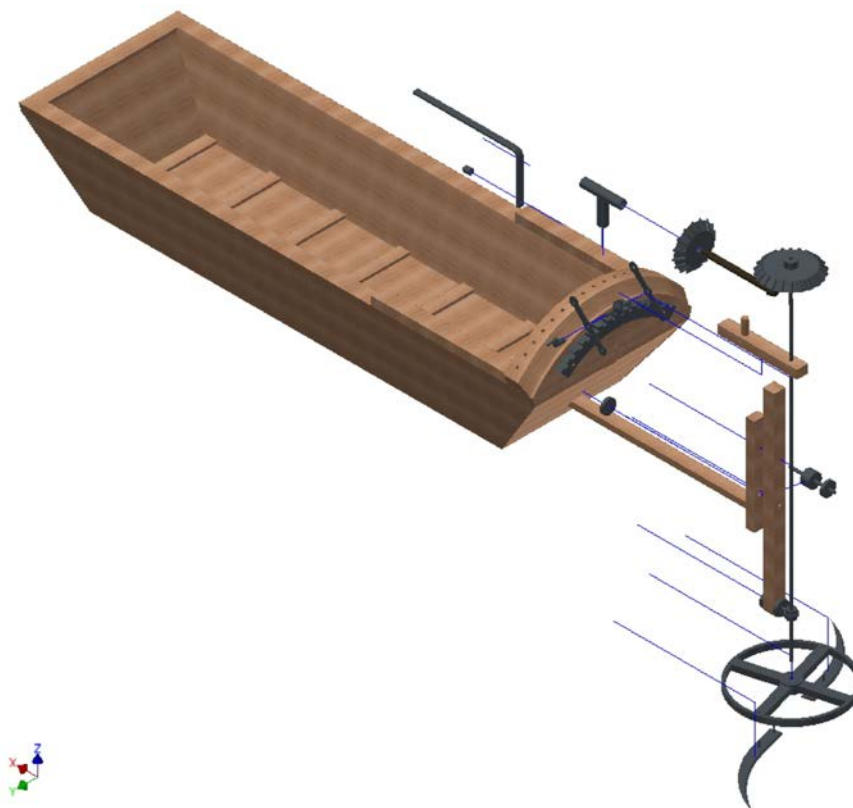


Figura 2.55. Perspectiva estallada con las piezas colocadas en su posición de montaje.

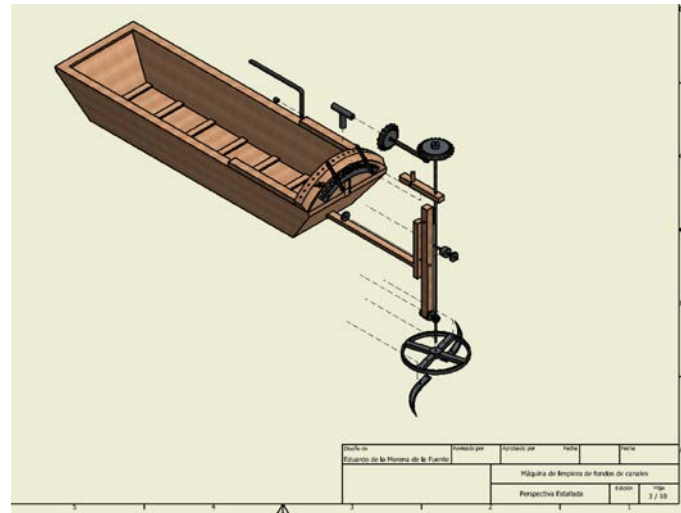


Figura 2.56. Perspectiva estallada importada a un plano.

2.2.3. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor Studio 2016

2.2.3.1. Creación de una imagen renderizada

La presentación de una imagen realista de las distintas invenciones estudiadas es otro de los objetivos del presente trabajo. Para la elaboración de imágenes renderizadas, Autodesk Inventor Professional 2016, ha desarrollado una aplicación donde se trabaja la imagen del modelo, Autodesk Inventor Studio. Para acceder a esta aplicación y a las herramientas de las que dispone es necesario pulsar el botón 'Inventor Studio' dentro del menú 'Entorno' (Figura 2.57).



Figura 2.57. Botón 'Inventor Studio'.

Una vez que el modelo está en Autodesk Inventor Studio, hay que seguir una serie de pasos para crear una imagen renderizada. La manera más sencilla de conseguir la renderización es establecer una vista similar a la que se quiere captar al renderizar, y utilizar la opción 'Crear cámara según vista' del menú contextual (Figura 2.58).

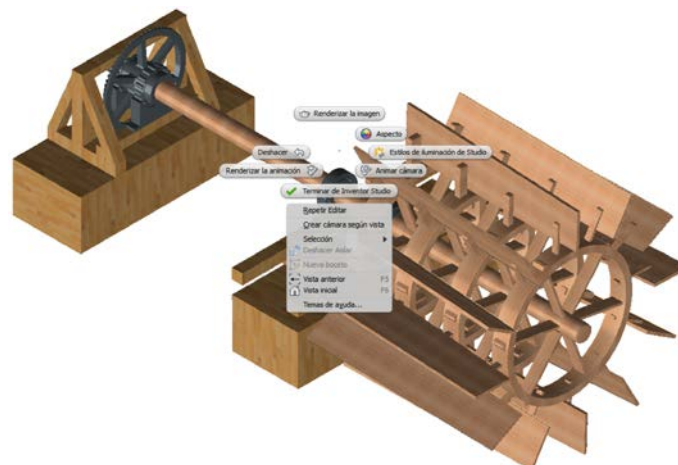


Figura 2.58. Opción 'Crear cámara según vista'.

Una vez creada la cámara, se pueden editar las propiedades de la misma como su posición, la profundidad de campo, el zoom, el ángulo de rodaje y si se quiere en perspectiva axonométrica o cónica (Figura 2.59).

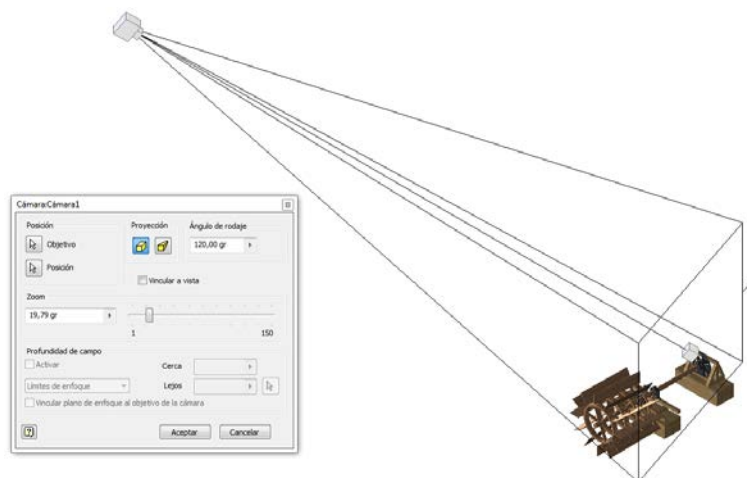


Figura 2.59. Toma de imagen con definición de cámara.

Editadas las propiedades de la cámara, el siguiente paso es establecer la iluminación entorno al modelo. Para configurar la iluminación existen dos opciones en el submenú de 'Escena' (Figura 2.60). La primera posibilidad es tomar directamente uno de los 'Estilos de iluminación de Studio', y la segunda definir la iluminación utilizando la opción de 'Luces locales'.

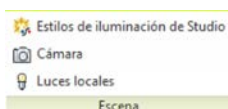


Figura 2.60. Submenú 'Escena'.

El submenú 'Estilos de iluminación de Studio' permite elegir entre varias posibilidades dando incluso la posibilidad de que el modelo aparezca rodeado de un escenario prefijado (Figura 2.61).

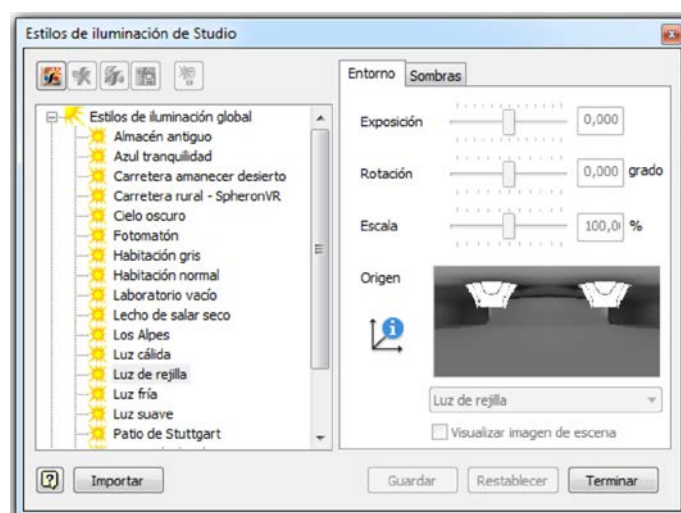


Figura 2.61. Cuadro de diálogo 'Estilos de iluminación de Studio'.

La segunda posibilidad 'Luces locales' es más laboriosa ya que hay que editar cada uno de los puntos de luz, su localización, el tipo de iluminación y la orientación deseada (Figura. 2.62). En la Figura 2.63 aparece un ejemplo en el que se han localizado dos puntos de luz para atenuar las sombras del modelo en torno a dos zonas del mismo.

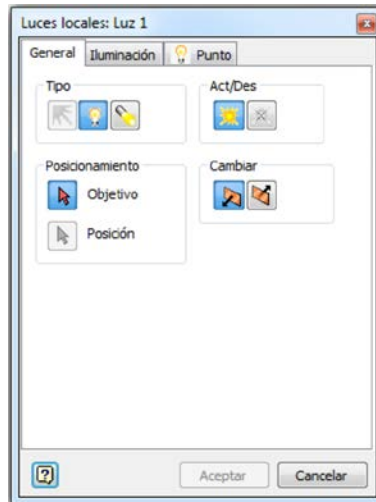


Figura 2.62. Cuadro de diálogo 'Luces locales'. Pestaña 'General'.

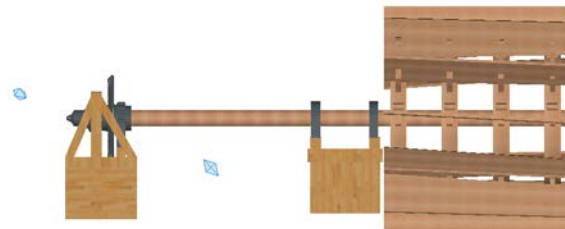


Figura 2.63. Localización de los puntos de luz en el modelo.

Tras localizar las luces se vuelve al cuadro de diálogo 'Luces locales' para definir la intensidad de cada uno de los puntos y el grado de atenuación de los mismos (Figura 2.64).

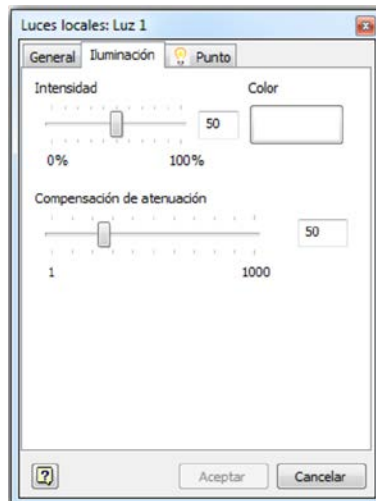


Figura 2.64. Cuadro de diálogo 'Luces locales'. Pestaña 'Iluminación'.

Una vez definidas las cámaras y las luces se presiona el botón 'Renderizar imagen' (Figura 2.65). Al hacerlo se despliega un cuadro de diálogo con las posibilidades que admite la renderización. La pestaña 'General', permite definir el tamaño de imagen de salida, la cámara con la que se quiere tomar la imagen y la iluminación que previamente se ha definido (Figura 2.66).



Figura 2.65. Botón 'Renderizar imagen'.

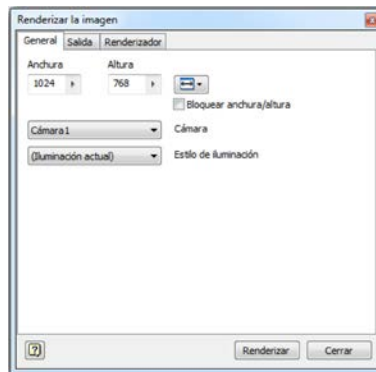


Figura 2.66. Cuadro de diálogo 'Renderizar la imagen'. Pestaña 'General'.

La pestaña 'Renderizador' permite editar el tipo de renderizado. La imagen se puede obtener por ciclos de renderizado que van mejorando el aspecto de la misma, o por tiempo de renderizado. A mayor tiempo o a mayor número de ciclos la imagen es de mayor calidad (Figura 2.67).

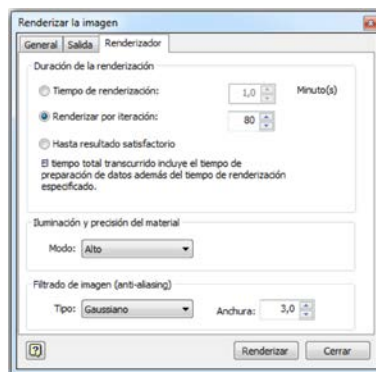


Figura 2.67. Cuadro de diálogo 'Renderizar la imagen'. Pestaña 'Renderizador'.

El resultado del mismo en proceso (Figura 2.68), es una imagen con un alto nivel de definición en la que se aprecian mejor los materiales y la geometría del conjunto. La imagen admite varios tipos de salida de formato gráfico que el usuario puede seleccionar en la pestaña Salida.

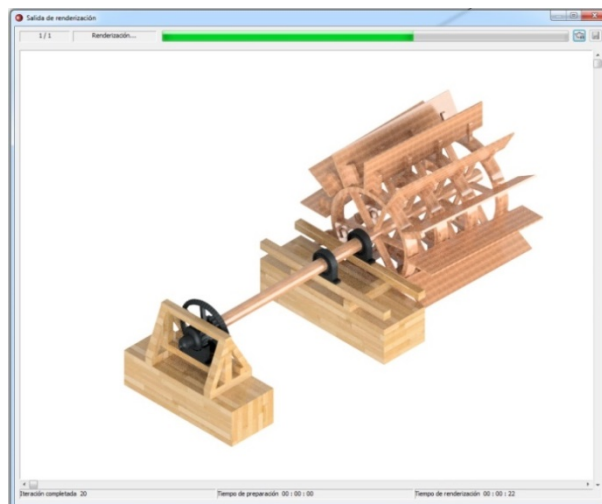


Figura 2.68. Proceso de renderización de la imagen.

2.2.3.2. Creación de una animación

Los pasos para crear una animación en Autodesk Inventor Studio son parecidos a los utilizados para crear una imagen renderizada. Por lo tanto, tras determinar la iluminación deseada para el

modelo y una vez definidos los parámetros de las cámaras que se desean utilizar, comienza el proceso propio de animación.

Asimismo, Inventor Studio permite la animación de componentes concretos y la animación de las propias cámaras. Ambas opciones aparecen en el menú 'Animar' (Figura 2.69).



Figura 2.69. Menú 'Animar'.

En primer lugar, se presiona sobre el botón 'Duración de la animación' que abre a su vez una ventana permitiendo editar el rodaje segundo a segundo, y controlar las acciones de cada componente animado, tanto de cámara como de componente (Figura 2.70).

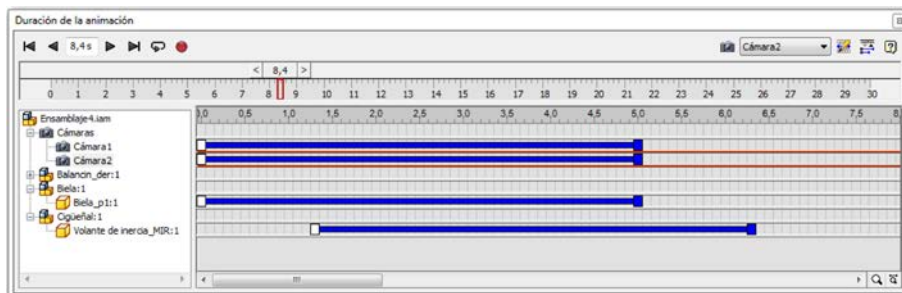


Figura 2.70. Cuadro de edición de la animación.

El siguiente paso es animar los componentes del modelo para que éste muestre su funcionamiento. Este proceso es especialmente delicado ya que el movimiento de los componentes puede afectar a las restricciones que hemos definido al realizar el ensamblaje. Por ello, si el modelo no está perfectamente definido y ensamblado, la animación del mismo es sumamente complicada. Por el contrario, si la relación de componentes está bien definida, la animación no presentará mayores dificultades.

Para concretar la animación de un componente hay que presionar el botón 'Componentes' del menú 'Animar'. Esta opción abre a su vez un cuadro de diálogo que permite varias opciones (Figura. 2.71). En primer lugar, se seleccionan los componentes que quieren moverse. Tras esta elección se especifica el tiempo apropiado para la duración de ese movimiento, y por último, se presiona el botón 'Posición' que representa sobre el modelo el eje de coordenadas que permite desplazar o girar el componente respecto a cualquiera de los ejes (Figura 2.72).

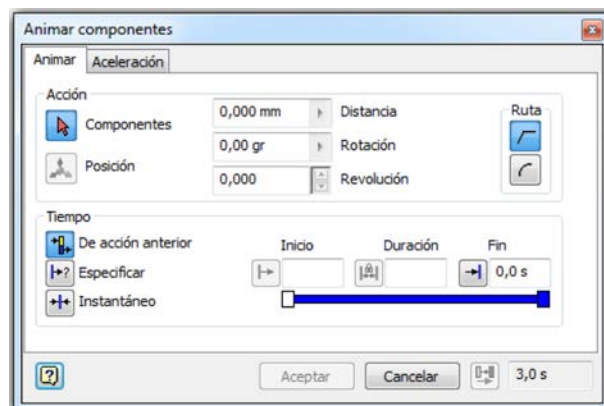


Figura 2.71. Cuadro de diálogo 'Animar componentes'.

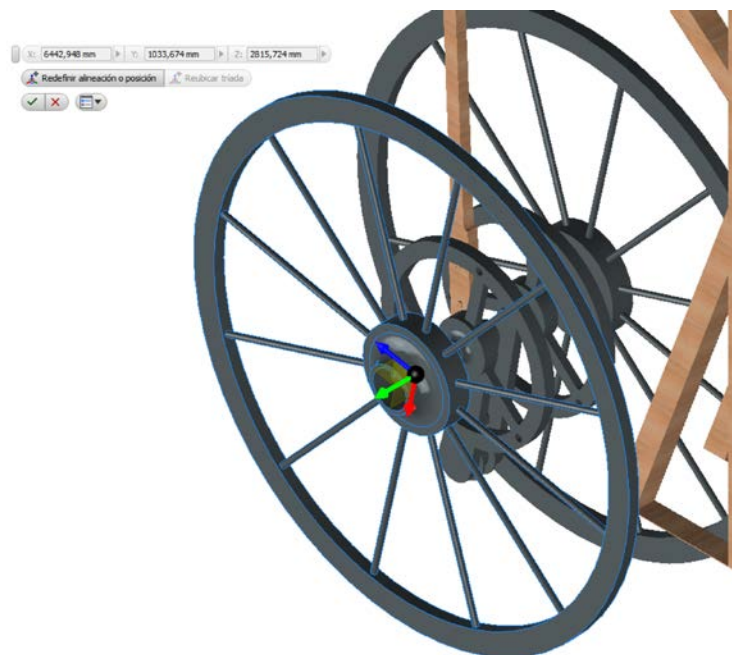


Figura 2.72. Posición del componente a animar.

Terminada de definir la trayectoria de los componentes a animar, estos van apareciendo en el cuadro de edición de la animación como vimos anteriormente. Las animaciones de los distintos componentes pueden darse simultáneamente o unos después de otros a la libre elección del editor. Finalizada la animación de los componentes y una vez que se ha comprobado que el modelo muestra adecuadamente su funcionalidad, se pasan a animar las cámaras.

La animación de las cámaras se obtiene presionando el botón 'cámara' del menú 'Animar'. Este botón despliega a su vez un cuadro de diálogo de la animación de la cámara dividido en tres pestañas (Figura 2.73).

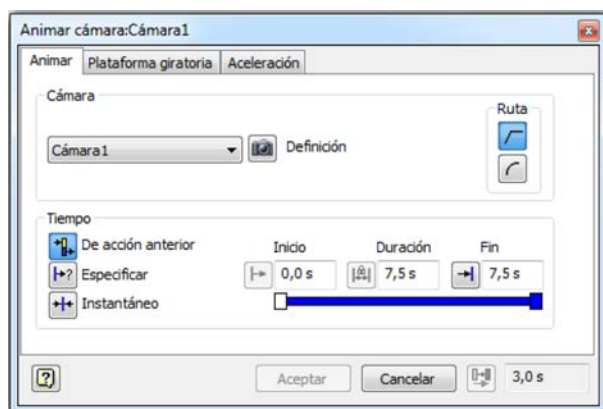


Figura 2.73. Cuadro de diálogo 'Animar cámara'. Pestaña 'Animar'.

En primer lugar, para animar la cámara hay que elegir una de las cámaras anteriormente definidas. Acto seguido se establece el tiempo de rodaje de dicha cámara, de modo similar a como se definía el tiempo de acción del componente. En principio, el software va a tomar por defecto la posición inicial de la cámara como aquella que se definió previamente. Para definir su posición final hay que pulsar el botón 'Definición', con el que se abre un nuevo cuadro de diálogo que va a servir para definir la nueva posición y la nueva dirección del objetivo (Figura 2.74).

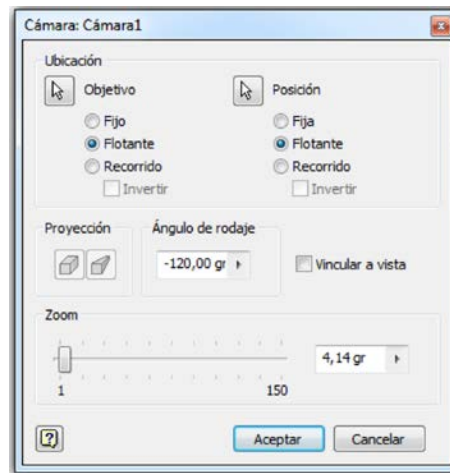


Figura 2.74. Cuadro de diálogo 'Cámara'.

Terminada de definir la animación de cada cámara, éstas aparecen en el cuadro de edición de la animación junto con las animaciones de los componentes. Por último, Autodesk Inventor Studio permite rotar la cámara respecto al modelo simulando que éste se encuentra en una plataforma giratoria (Figura 2.75). Para definir este tipo de movimiento con la cámara en el menú 'Animar cámara' existe una pestaña llamada 'Plataforma giratoria' con el que podemos concretar esta acción (Figura 2.76).

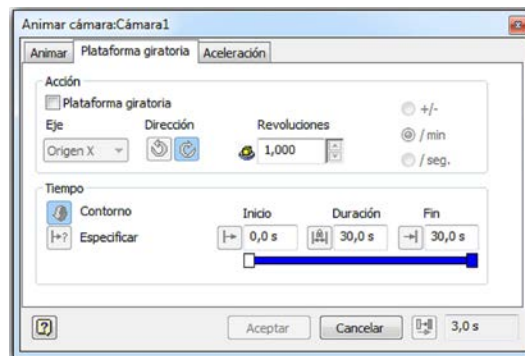


Figura 2.75. Cuadro de diálogo 'Animar cámara'. Pestaña 'Plataforma giratoria'.

Una vez definidas las animaciones de cámaras y el movimiento de las piezas del ensamblaje, en la ventana de duración de la animación se pulsa el botón de grabar (Figura 2.76). Al hacerlo se abre una ventana exactamente igual al cuadro de diálogo de renderizado, donde se definen los parámetros de renderizado de cada uno de los fotogramas (frames) del videomontaje.

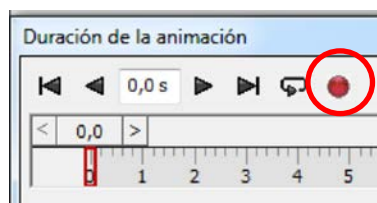


Figura 2.76. Botón para grabar la animación.

Para terminar, con los distintos vídeos grabados, Autodesk Inventor Studio permite producir un montaje final que puede ser exportado en archivos de formato .wmv o .avi, ambos compatibles con cualquier medio de reproducción de vídeos (Figura 2.77). En la producción del montaje final se pueden definir las transiciones entre tomas, y además el archivo de la animación es compatible con cualquier otro programa de montaje de vídeos más general donde se podrían introducir títulos, música u otras opciones.

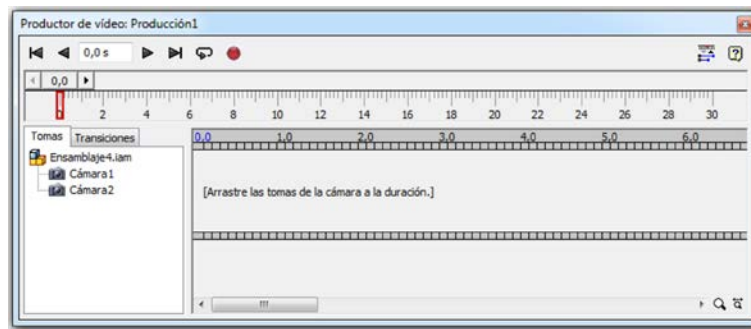


Figura 2.77. Cuadro de edición del vídeo.

2.3. Fabricación aditiva (Impresión 3D)

2.3.1. Introducción

El último eslabón a la hora de desarrollar la metodología seguida en el presente trabajo es abordar cómo se ha llevado a cabo la impresión 3D de cada uno de los ingenios abordados en el estudio. La impresión 3D en plástico, también llamada fabricación aditiva, que ha tenido una gran difusión estos últimos años, tiene su origen en una serie de investigaciones que se desarrollaron en la década de los años 80.

En 1981, Hideo Kodama del Instituto de Investigación Industrial Municipal de Nagoya, inventó dos métodos aditivos para fabricar modelos plásticos tridimensionales con polímero termoestable fotoendurecible, donde el área de exposición estaba controlada por un transmisor de fibra óptica. En 1984, varios ingenieros de la French General Electric Company presentaron una patente para el proceso de estereolitografía por medio de unas rudimentarias impresoras de inyección. La aplicación patentada acabó abandonada por falta de perspectiva empresarial. También en 1984, Chuck Hull de 3D Systems Corporation presentó su propia patente para un sistema de fabricación de estereolitografía en el que las capas se agregaban mediante fotopolimerización de láseres de luz ultravioleta. La contribución de Hull fue el formato de archivo STL (STereoLithography), así como las estrategias de corte y relleno digital comunes a muchos procesos en la actualidad.

La tecnología utilizada por la mayoría de las impresoras 3D comerciales es el modelado de deposición fundida, una aplicación especial de extrusión de plástico, desarrollada en 1988 por S. Scott Crump y comercializada por su compañía Stratasys, que comercializa su primer FDM (Fused Deposition Modelling) en 1992 (López Cónde, 2016).

El término impresión 3D originariamente se refería a un proceso de cama de polvo que utilizaba cabezas de impresión de chorro de tinta estándar personalizadas, desarrollado en el MIT en 1993, y comercializado por varias empresas. El año 1993 también vio el comienzo de una compañía llamada Solidscape, que introdujo un sistema de fabricación de chorro de polímero de alta precisión con estructuras de soporte solubles (clasificada como una técnica de "punto sobre punto"). Esta tecnología no sólo ha dado lugar a las populares impresoras 3D que imprimen modelos en polímero, sino que también ha sido una técnica revolucionaria en los procesos metalúrgicos para la confección de elementos evitando el uso de moldes y soldaduras. Toda esa tecnología también tiene un proceso de desarrollo amplio que ha llegado hasta nuestros días (Hernández Álvarez *et al.*, 2014).

Existen diferentes tipos de impresoras 3D en función del material y el modo de crear el objeto 3D (AAVV., 2014).

- Impresoras FDM. Utilizan la técnica de modelado por extrusión de deposición fundida de plásticos que tienen un punto de fusión bajo como el PLA (poliácido láctico), ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), HDPE (polietileno de alta densidad), HIPS (poliestireno de alto impacto) o el TPU (poliuretano termoplástico). El cabezal de la impresora alcanza la temperatura de fusión requerida y deposita fibras del material. En pocos instantes, éste vuelve al estado sólido con la forma deseada y sirviendo de base para las sucesivas capas.
- Sinterizado selectivo por calor (SHS). Utilizan una técnica de granulado a partir de polvos termoplásticos. Se calienta una capa de polvo termoplástico tras otra hasta conseguir la estructura deseada.
- Sinterizado selectivo láser (SLS). Utilizan también la técnica de granulado a partir de termoplásticos calentados por láser. Estos plásticos de alta densidad tienen un punto de fusión alto, y presentan la facultad de que una vez llegados al estado sólido pueden volver a fundirse para dar otras formas, manteniendo relativamente bien sus propiedades.
- Laminado de capas (LOM). Fabricación aditiva que no necesita de altas temperaturas ni de cámaras de vacío para su funcionamiento. La tecnología consiste en ir colocando finas láminas de material (papel, plástico o incluso metal) que posteriormente son recortadas con la forma de la pieza por una fresadora o un láser de CO₂. Un rodillo caliente pasa sobre la hoja de material en la plataforma de construcción para fusionar el adhesivo aplicado y presionar las láminas sobre la plataforma.
- Estereolitografía (SLA). La fotopolimerización es la tecnología de impresión 3D más antigua que existe. Básicamente consiste en un fotopolímero líquido en una cubeta que se endurece selectivamente capa a capa mediante polimerización activada por la luz.
- Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC). Técnica fotoquímica similar a la anterior cuya única diferencia es que en este caso es la luz ultravioleta la que endurece selectivamente las capas del polímero líquido.

Cada una de las técnicas de impresión tiene sus ventajas e inconvenientes. Las impresoras más precisas, las que utilizan fotopolímeros tienen el inconveniente que utilizan polímeros que en general son poco resistentes. Por el contrario, las técnicas de laminado pueden utilizar plásticos más resistentes, pero al utilizar fresadoras y láser para el corte, provoca que las geometrías más complejas no tengan la definición deseada. Por último, las técnicas de sinterización o extrusión están entre estos dos extremos.

Con el tiempo, los materiales y las aleaciones, como las de plástico y aluminio, lograrán que las impresoras lleguen a un nivel de precisión óptimo con materiales mucho más resistentes.

2.3.2. Impresoras y materiales utilizados

Las impresoras utilizadas para la impresión 3D de los modelos han sido dos: una impresora FDM con PLA como filamento extrusor para las partes de geometría sencilla; y una impresora SLA con un fotopolímero para las zonas de geometría más compleja que necesitaban un mayor detalle. El laboratorio de Fabricación Digital y creación de prototipos de la Universidad de Jaén (FAB LAB), cuenta con algunas impresoras que se han utilizado para la impresión de los modelos 3D.

La impresora FDM disponible es una impresora AirWolf 3D HD modelo estándar. Esta impresora de amplia difusión es muy conveniente para la fabricación de piezas de geometría sencilla y gran resistencia (Figura 2.78).

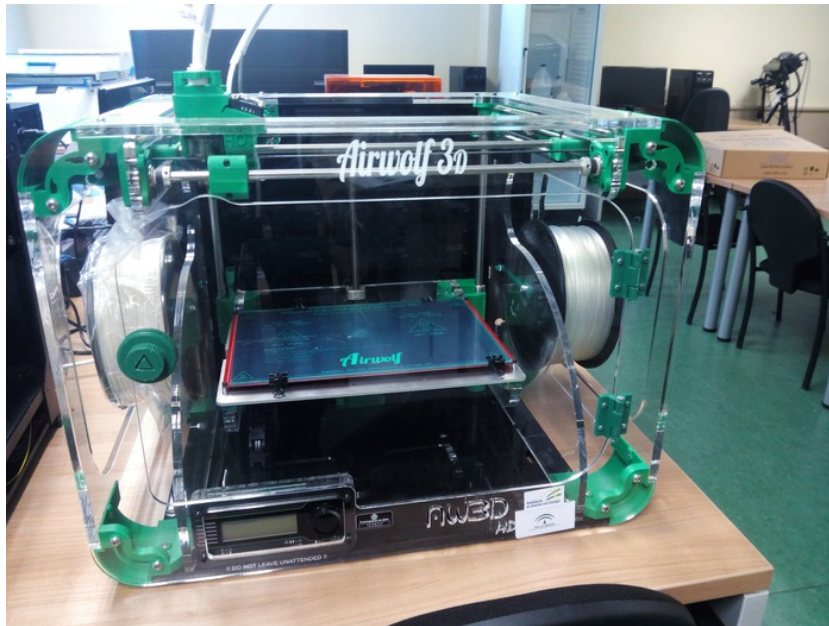


Figura 2.78. Impresora AirWolf 3D HD.

Se trata de una impresora que tiene un volumen de impresión de 297 x 210 x 300 mm, y dispone de una cama caliente sobre la que se imprime el objeto. El cabezal de impresión genera un filamento de entre 0.35-0.5mm y admite un filamento de 2.85mm fundamentalmente de PLA, ABS o HIPS. El software para la simulación y control de la impresión es el programa Cura 3.2.0 permitiendo la impresión de archivos únicamente en formato STL y OBJ.

La impresora SLA disponible es una impresora Stratasys Objet 30. Esta impresora, por contraste con la otra, es una de las impresoras más precisas del mercado para el material que utiliza (Figura 2.79).



Figura 2.79. Impresora Stratasys Objet 30.

Se trata de una impresora que tiene un volumen de impresión de 294 x 192 x 148,6 mm, algo inferior comparada con la otra. Imprime utilizando un proyector de luz ultravioleta que endurece las capas de un fotopolímero sensible a este espectro de luz. La impresora inyecta ese fotopolímero y un material de soporte gelatinoso, siendo capaz de generar filamentos de hasta

16 micras, por lo que es mucho más precisa que la impresora AirWolf 3D HD. El mecanismo empleado en la impresión también hace que el tiempo de impresión sea menor. Para procesar y simular la impresión la impresora tiene un software propio, Objet Studio, compatible con archivos STL y OBJ.

Respecto a los materiales empleados, la impresora AirWolf 3D HD ha utilizado PLA, concretamente Smartfil PLA Ivory White de 2,85 mm, aunque para algunos elementos flexibles también se ha utilizado un termoplástico elastómero Smartfil Flex de 2,85 mm. El material utilizado para la impresión precisa es un fotopolímero similar al polipropileno con algunos añadidos llamado VeroBlackPlus y creado por la propia compañía Stratasys.

2.3.3. Proceso de impresión

La impresión 3D es un proceso que tiene un recorrido especial desde el modelo gráfico CAD hasta el montaje final de los elementos impresos. El método seguido para la elaboración del modelo 3D a partir de Autodesk Inventor Professional ha sido el siguiente:

2.3.3.1. Preprocesado de piezas y ensamblajes

El primer paso para la impresión de un modelo 3D es el preprocesado. En sí mismo, no tiene una herramienta concreta ni un protocolo a seguir. La impresión de un mecanismo debe conseguir varias finalidades, y a veces, algunas de ellas no son compatibles. La primera finalidad es que represente, del modo más verosímil, la invención original; la segunda es que respete, en la medida de lo posible, los mecanismos y la funcionalidad para la que había sido diseñada, y la tercera finalidad, es que presente las dimensiones suficientemente grandes para obtener una visión didáctica o estructural, si se quiere utilizar para ensayos.

Las dimensiones del modelo, por lo tanto, son realmente el factor limitante en todo el proceso. Un modelo suficientemente grande siempre va a mostrar las características del patrón original, pero las dimensiones de la impresora limitan dicho tamaño, y a veces, hay que sacrificar una de las tres finalidades para mantener las otras dos.

En el preprocesado se debe estudiar si se imprimen independientemente todas las piezas o no. Imprimir un conjunto de piezas ya ensambladas evita el posterior montaje, ahorra tiempo de impresión y material, por lo que tiene sus ventajas. Por lo tanto, a modo de corolario, se puede decir que la guía que debe dirigir el preprocesado es que, si la impresión del conjunto ensamblado de piezas no distorsiona la funcionalidad del mecanismo, siempre es preferible imprimirlas ensambladas que independientemente.

2.3.3.2. Transformación de elementos a formato STL

Elegidas las piezas que van a imprimirse de manera independiente y aquellas que se van a imprimir como un conjunto ensamblado, hay que exportar dichos ficheros a un formato que pueda reconocer el software de la impresora. Para ello hay que seleccionar la pieza o ensamblaje que se quieren exportar a un nuevo formato, seleccionando la opción 'Formato de CAD' (Figura 2.80).

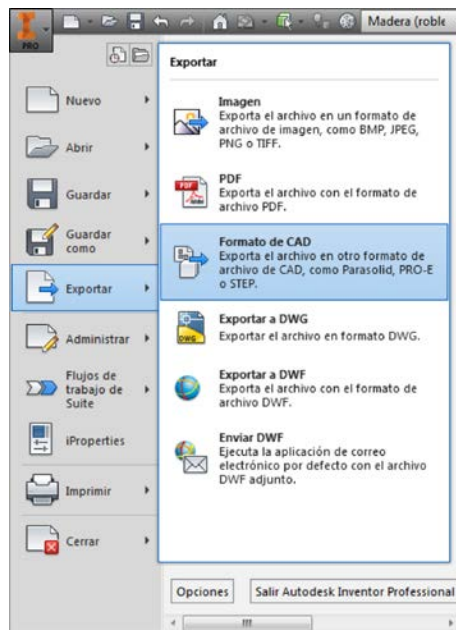


Figura 2.80. Submenú 'Exportar' dentro del menú inicial de Autodesk Inventor Professional.

Una vez pulsado este botón se abre un cuadro de diálogo donde se debe indicar el lugar para guardar el archivo, su nombre y el formato elegido. Elegida la ubicación y el nombre, es importante que el formato del archivo que se quiere exportar sea STL (Figura 2.81), es decir, en formato (STereoLithography) que es un formato simplificado. Esto significa que la pieza o ensamblaje mantiene la geometría externa, pero queda vacía interiormente. El software de las impresoras 3D reconoce universalmente este tipo de archivos.

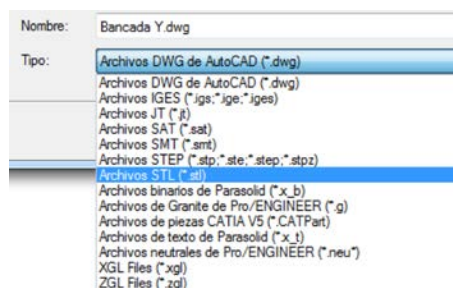


Figura 2.81. Selección del tipo de archivo STL.

2.3.3.3. Dimensionado y posicionamiento

Terminada la conversión a formato STL de las piezas y ensamblajes que se quieren imprimir, hay que discriminar los elementos atendiendo a su complejidad geométrica. Los elementos geoméricamente sencillos y de dimensión adecuada se imprimirán por deposición fundida (FDM) utilizando materiales de alta resistencia. En cambio, los elementos que sean clasificados como complejos o de dimensión insuficiente, se imprimirán mediante fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC), logrando piezas de mayor precisión y acabado.

Como se ha mencionado con anterioridad, para la impresión de elementos de geometría sencilla y sin especiales requerimientos de alta precisión, se ha elegido la impresora AirWolf 3D HD y PLA como material de trabajo. Para esta impresora, existe un programa de acceso libre que simula la impresión 3D y que es capaz de configurar los parámetros de impresión, el software Cura 3.2.0. Para la impresión de estos elementos el primer paso, por lo tanto, es importar los archivos STL a este software. El programa en sí mismo tiene la virtud de ser muy sencillo, casi todo el proceso de impresión se realiza en la misma interfaz (Figura 2.82).

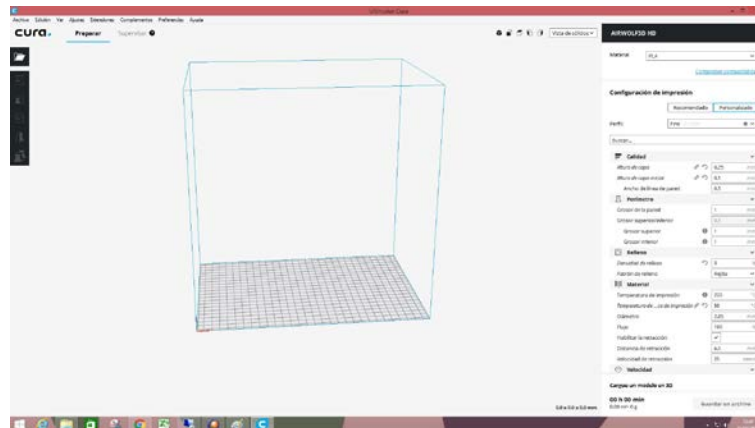


Figura 2.82. Pantalla de inicio del software para la impresión 3D en la impresora AirWolf 3D HD.

Los archivos se abren pulsando el botón “Abrir archivo” de la interfaz o simplemente arrastrando el archivo sobre la pantalla del programa (Figura 2.83).

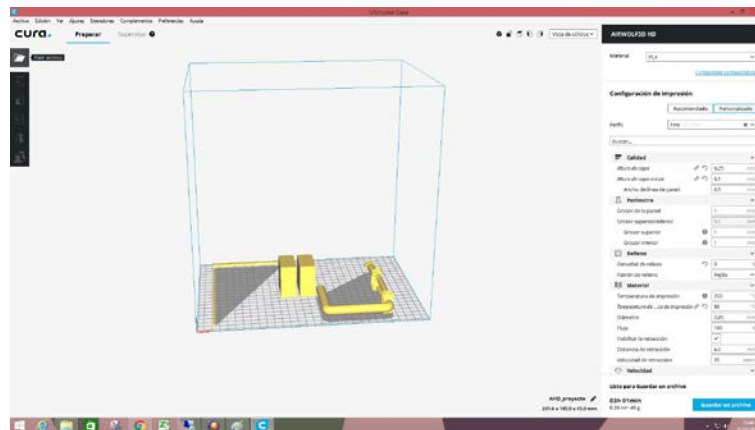


Figura 2.83. Opciones del cuadro de diálogo ‘Abrir archivo’ de la impresora AirWolf 3D HD.

Una vez abierto el archivo del modelo, éste aparece con su geometría simplificada y fabricado en un material neutro. El primer paso para su impresión es localizarlo en la impresora 3D, y para ello, el software permite simular el espacio interior aprovechable de la impresora AirWolf 3D HD. En ese espacio se coloca la pieza y automáticamente ésta se sitúa sobre la superficie de impresión. La posición de la pieza depende de un sistema de referencia que permite ser preciso en la colocación del elemento (Figura 2.84). Ese sistema está situado en el centro de gravedad de la pieza. Asimismo, a la hora de obtener una impresión satisfactoria, hay que cuidar los espacios entre los elementos, ya que la excesiva cercanía entre elementos puede llevar a la impresora a confundir las piezas uniéndolas mediante filamentos.

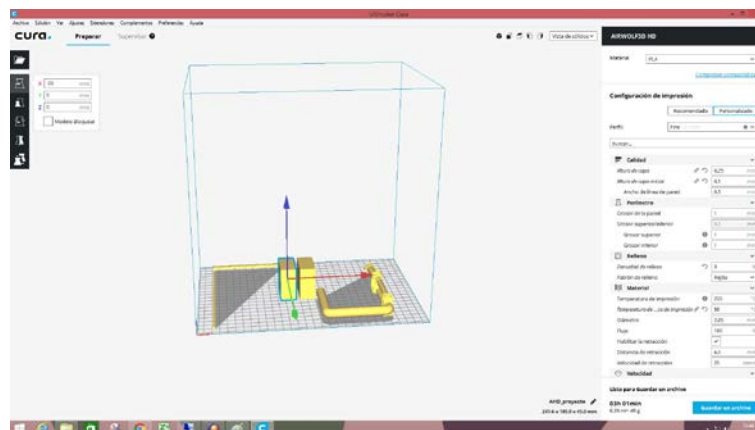


Figura 2.84. Localización de la pieza en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD.

Localizada la pieza en la superficie llega el paso más delicado del proceso: asignar una escala a la pieza. En principio, los modelos están realizados a escala 1:1, y, por lo tanto, es necesario aplicar una escala. Al pulsar el botón ‘Escalar’ (Figura 2.85), se introduce un porcentaje del tamaño que se quiere otorgar en cada dirección de la pieza. Asimismo, conviene que el escalado sea uniforme, ya que el escalado de las piezas hace variar sus dimensiones y con frecuencia, tras cambiar la escala, es necesario volver a localizar la pieza en un lugar donde no haya interferencias.

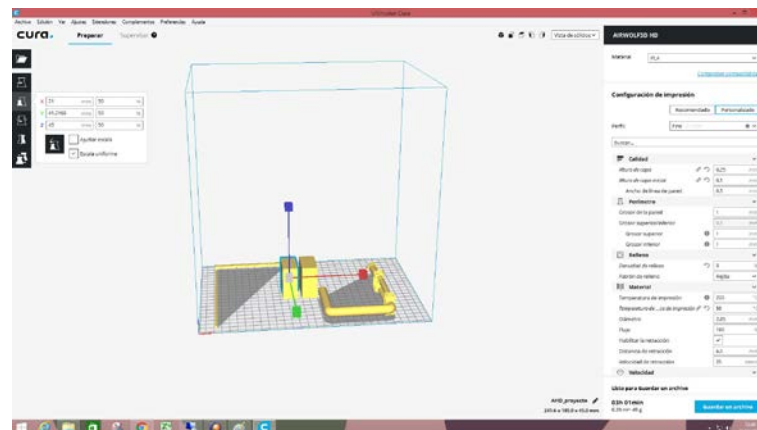


Figura 2.85. Cambio de escala de la pieza en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD.

El siguiente paso a tomar es la orientación de la pieza (Figura 2.86). La pieza, debido a su geometría, puede presentar huecos o espacios interiores. Todos los voladizos que presenta un elemento deben tener un pequeño sostén sobre el que imprimir para llegar a esa altura. Ese pequeño sostén, llamado ‘material de soporte’ o ‘soporte’, no pertenece a la pieza y posteriormente debe ser eliminado. En impresoras sencillas como la AirWolf 3D HD, el soporte está realizado con el mismo material de impresión y, por lo tanto, a veces no es sencilla la retirada de este material. Por todos estos motivos, la pieza hay que orientarla de modo que, en la medida de lo posible, se evite el voladizo de partes de los elementos. Esto a veces no es posible y cuando no lo es, siempre hay que elegir la orientación que cree la menor cantidad de soporte.

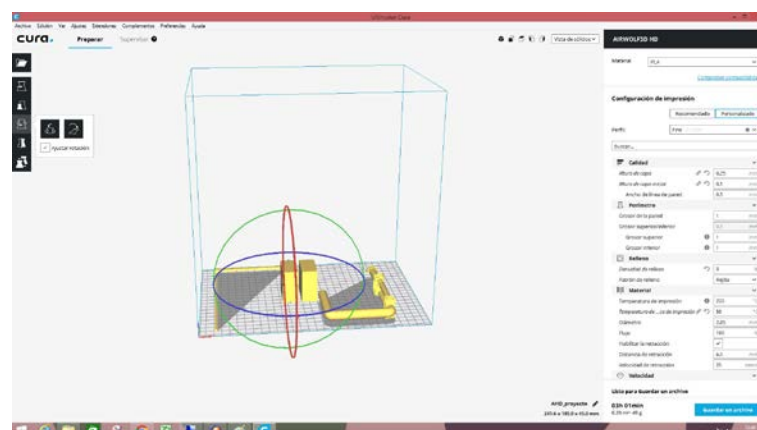


Figura 2.86. Orientación de la pieza en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD.

Terminados de colocar los elementos en el simulador de la impresora hay que ajustar los parámetros de impresión. De los parámetros a configurar, el primer parámetro importante es la ‘Densidad de relleno’. Como se ha explicado con anterioridad, las piezas en su interior están vacías, al ser archivos de formato STL. La impresora crea un mallado automático interior, muy parecido al soporte del que se ha hablado anteriormente, que sirve para poder imprimir los contornos de la figura, siendo la densidad de este mallado determinada por el usuario. No conviene utilizar densidades excesivamente pequeñas (menores del 20%), ya que la impresora

necesita un mínimo de material para depositar las fibras sobre alguna superficie. Si no se respeta este mínimo, las paredes de la pieza pueden verse afectadas y la geometría del elemento comprometida. Del mismo modo, también se puede configurar la ‘Densidad del soporte’, siguiendo un criterio muy parecido al anterior.

Otra de las variables que a veces conviene cambiar es el “Ancho de la línea de pared”. Este parámetro permite establecer el espesor de las paredes de las piezas. En piezas sencillas de geometría simple, se puede aumentar el espesor de las paredes para utilizar densidades de relleno menores con el fin de ahorrar material. En este caso, como las paredes son más robustas, hace falta menos estructura de soporte ya que el filamento pasa más veces por el mismo lugar. En piezas de geometría variable o curva, el aumento del ancho puede afectar a la terminación de la pieza, dando lugar a piezas poco redondeadas. La Figura 2.87 muestra los distintos parámetros que pueden configurarse, aunque los principales son los anteriormente comentados.

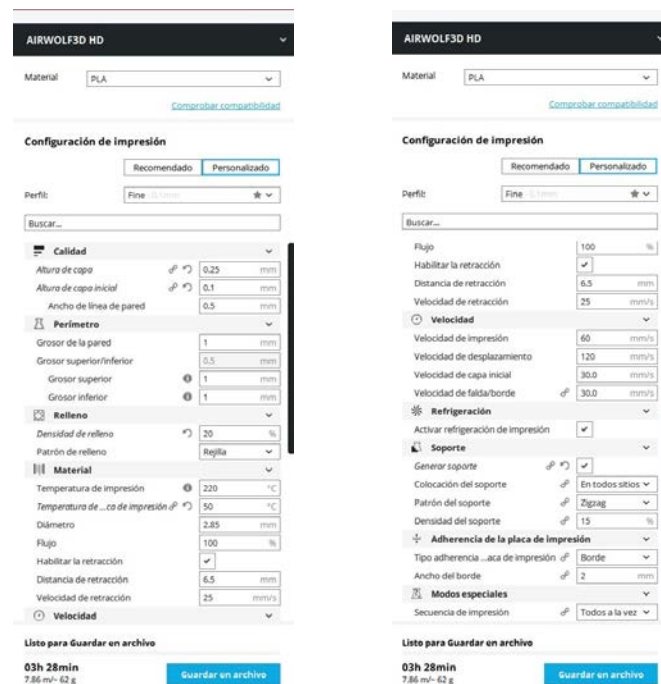


Figura 2.87. Menú de configuración de la impresora AirWolf 3D HD.

Para terminar, conviene supervisar en la ‘Vista de capas’ cómo se ha de hacer la impresión por niveles. Esta vista muestra las paredes, el soporte y las zonas internas de las piezas a imprimir (Figura 2.88). Terminadas todas estas operaciones el simulador ofrece una estimación del plástico a consumir y el tiempo de impresión.

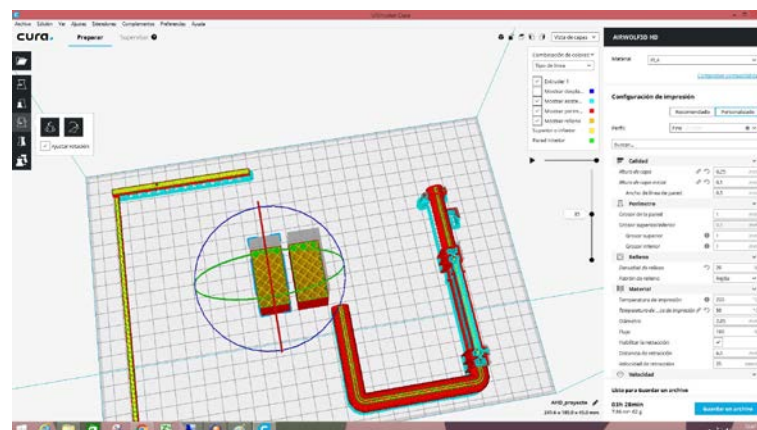


Figura 2.88. Vista de capas de la impresión 3D en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD.

Para la impresión de elementos de alta precisión se ha contado con la impresora Stratasys Objet 30 que utiliza resina fotosintética. La compañía Stratasys tiene un software propio (Objet Studio) que tiene un cometido análogo al programa Cura anteriormente citado, es decir, simula la impresión 3D en la impresora Stratasys y permite configurar los parámetros de impresión. Como en el caso anterior no es un software que permite el diseño de las piezas, por lo que éstas una vez terminadas, deben ser importadas directamente en formato STL.

Objet Studio difiere algo con el software Cura 3.2.0, ya que permite la modificación de un menor número de parámetros ya que estos están directamente relacionados con la calidad y acabado de las piezas. El entorno de trabajo para la simulación se muestra en la Figura 2.89.

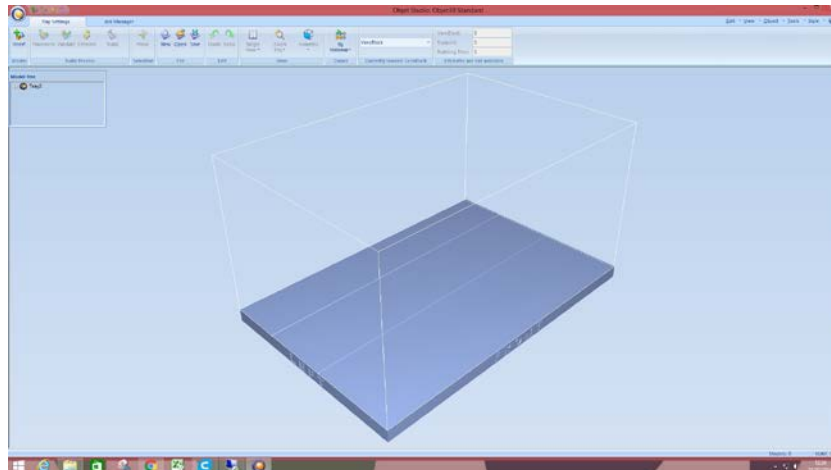


Figura 2.89. Pantalla de inicio del software para la impresión 3D en la impresora Stratasys Objet 30.

Una vez importado el fichero STL de la pieza que se quiere imprimir, la pieza debe ser escalada, girada y trasladada. Estas operaciones se efectúan en la misma ventana 'Transform' (Figura 2.90). Como se ha comentado con anterioridad dar una dirección y lugar adecuado es importante, pero los motivos cambian respecto a la impresora FDM. En la impresora Stratasys Objet 30, la forma de imprimir es a través de la fotopolimerización por rayos ultravioletas, por lo que la manera de generar las capas del elemento es diferente a la impresora AirWolf 3D HD (FDM). Concretamente el material de soporte es una resina gelatinosa que se puede retirar al terminar modelar la pieza de un modo sencillo. Así pues, en este caso, el criterio a la hora de orientar la pieza no es la creación de soporte, sino disponerlas de modo que alcancen la menor altura posible ya que a mayor altura, el tiempo de impresión se incrementa notablemente, y el material que se consume también.

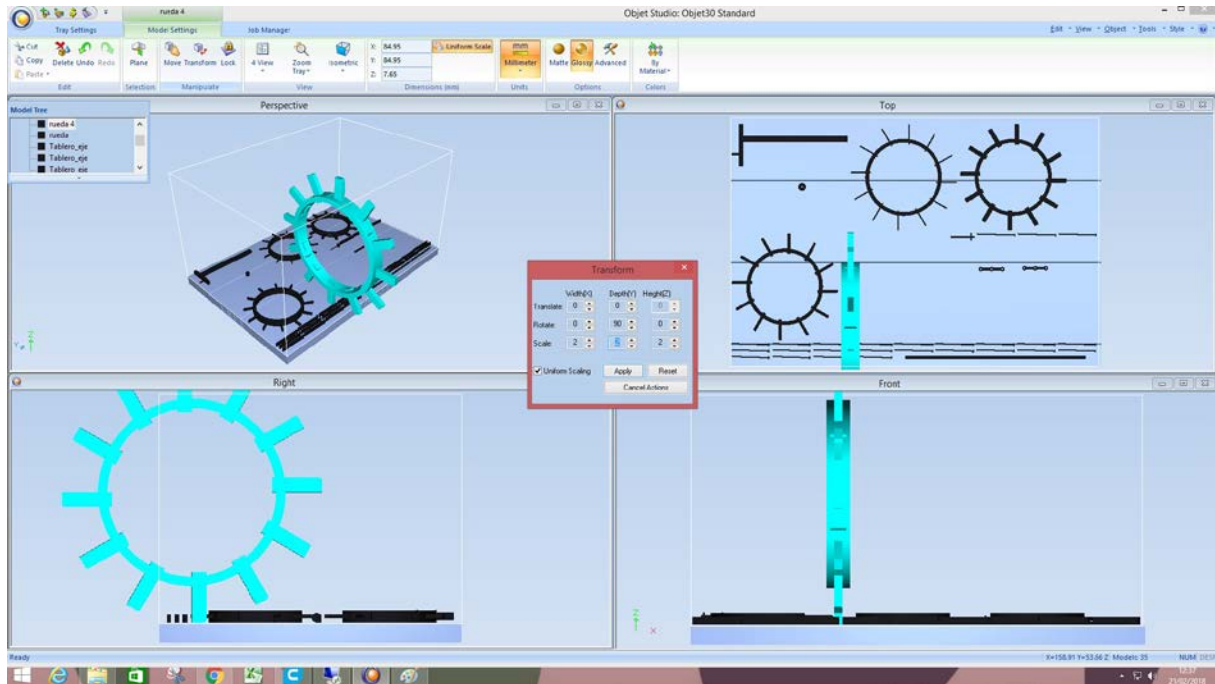


Figura 2.90. Ventanas de transformación de un objeto en el simulador de la impresora Stratasys Objet 30.

Dispuesta la pieza, el software la coloca automáticamente en contacto con la cama caliente, donde va a tener lugar la impresión, generando las vistas de impresión de las piezas (Figura 2.91). Estas vistas permiten observar detenidamente si las piezas están en contacto entre sí y con la cama para que no haya ningún error. El simulador no permite muchas más opciones de configuración más allá de si se quiere un acabado en mate o brillo, proporcionando los datos de peso y tiempo estimado en la impresión.

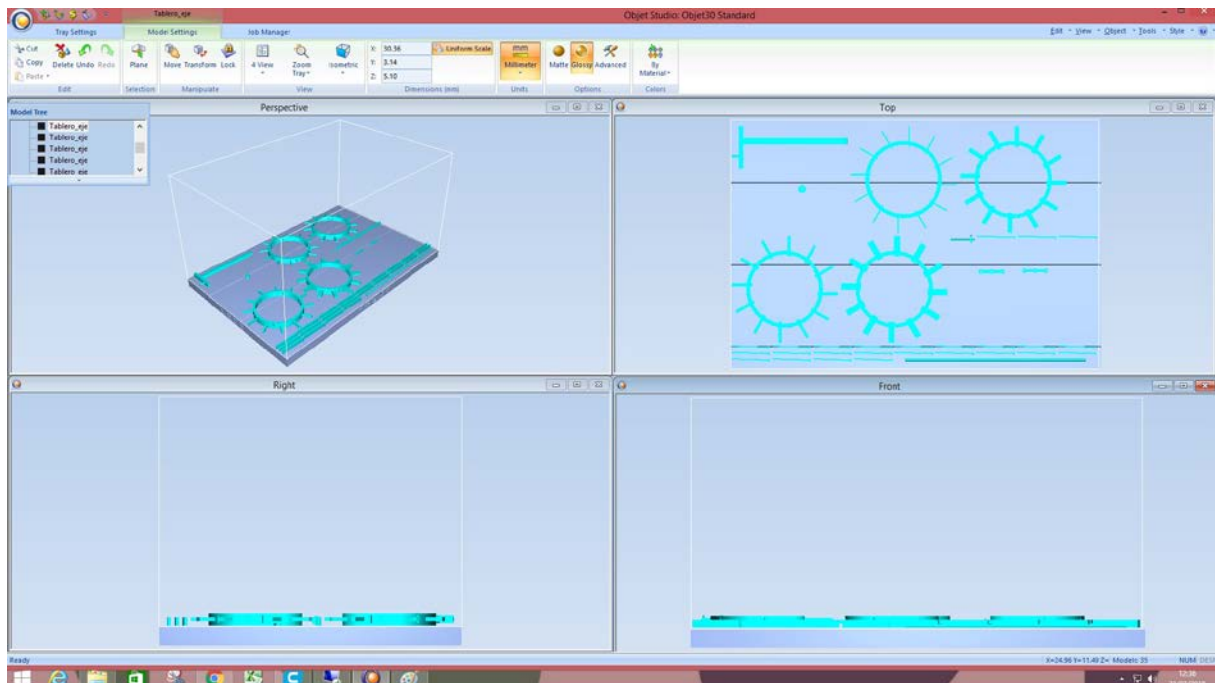


Figura 2.91. Vistas de impresión de las piezas en el simulador de la impresora Stratasys Objet 30.

Al pulsar la opción 'Print', se abre una ventana de impresión (Figura 2.92). Esta interfaz permite conocer el tiempo restante de impresión y la cantidad de material (soporte y estructural) que le queda. El proceso de impresión una vez iniciado no debe interrumpirse.



Figura 2.92. Ventana de impresión de la impresora Strataysys Objet 30.

2.3.3.4. Acabado de piezas

Una vez terminadas de imprimir las piezas es necesaria la limpieza de las mismas. En principio se ha observado un cuidadoso proceso para que éstas tengan la geometría deseada, pero no siempre es así.

Por una parte, hay piezas con soporte. La eliminación del soporte es una condición necesaria para que la pieza trabaje como ha sido diseñada, por lo que este paso no se debe omitir. La retirada del soporte no siempre es sencilla, sobre todo cuando se ha trabajado con PLA ya que el material soporte es el mismo que el material estructural. Para su retirada es necesario material de bricolaje. Sin embargo, para la retirada del soporte del fotopolímero, no es necesario este material, ya que el baño de las piezas en una disolución acuosa de carbonato cálcico (CO_3Ca) al 3% durante un tiempo breve, facilita la retirada del mismo sin la necesidad de emplear medios mecánicos. Es importante cuidar el tiempo de inmersión en este medio ya que, un tiempo excesivo, puede afectar a la pieza.

Por otra parte, algunas piezas presentan taladros o tienen una geometría diseñada para acoplarse en otras piezas. Sin embargo, no siempre el tamaño de los cabezales permite un acabado exacto por lo que, con frecuencia es necesario pulir, taladrar y limar algunos elementos de conexión.

2.3.3.5. Montaje o ensamblaje final

El último paso es el montaje de las maquetas a escala. Si las piezas tienen un acabado detallado el montaje es sencillo, pero si por el contrario las piezas no están bien acabadas, puede ser problemático.

En los modelos hay que evitar pegar piezas, pues es conveniente que vayan unidas físicamente por enganches, pero no siempre es posible. Debido a esto, el uso de pegamentos adecuados es fundamental ya que pueden afectar directamente a la resistencia estructural del mecanismo. El uso de pegamentos derivados del cianocrilato suele ser muy eficaz debido tanto a su velocidad de pegado como a sus propiedades resistentes. Las piezas que basculan y giran deben ir

correctamente engranadas, y para ello es imprescindible que trabajen en la posición diseñada para ellos.

Por último, el montaje de los distintos mecanismos aporta un conocimiento importante sobre el proceso constructivo real de la invención, sus limitaciones y la conveniencia de unos materiales respecto a otros.

2.4. Ingeniería Asistida por Ordenador

2.4.1. Introducción

La ingeniería asistida por ordenador (CAE, del inglés *Computer-Aided Engineering*) es una disciplina que se encarga de analizar y simular los modelos creados por el entorno CAD para valorar sus características, propiedades, viabilidad, y rentabilidad. El principal cometido de esta disciplina, desde el punto de vista de la arqueología industrial, es el análisis de las máquinas y mecanismos diseñados en el pasado, con el fin de determinar si fueron posibles y estuvieron bien proyectados, qué debilidades presentaban y porqué han seguido determinados patrones constructivos. Evidentemente en el caso del presente estudio, el análisis CAE de los ingenios de Agustín de Betancourt va a servir para determinar, desde el punto de vista de la ingeniería, qué fortalezas y amenazas tenían sus ingenios y hasta qué punto se puede decir que eran ideas o proyectos.

El software Autodesk Inventor Professional, como se verá más adelante, tiene un conjunto de herramientas especialmente diseñadas para analizar los modelos CAD, creados con todas las características geométricas y propiedades físicas de sus materiales, lo que permite obtener una gran fiabilidad. Muchas empresas utilizan esta herramienta para dimensionar y realizar un completo análisis estático que optimice la estructura, ahorrándose de este modo mucho dinero en ensayos, ya que arrojan resultados muy cercanos a los calculados por estos motores basados en el análisis por elementos finitos (FEA, del inglés *Finite-Element Analysis*).

Por estos motivos, el análisis CAE es especialmente conveniente para los ingenios escogidos. Los resultados van a proporcionar una evaluación completamente objetiva de cada uno de los ingenios presentados, y con esos resultados se podrá formar un juicio pertinente sobre los diseños del ingeniero español Agustín de Betancourt y Molina.

2.4.2. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor Professional 2016

Uno de los objetivos del trabajo es el análisis estático de las invenciones de Agustín de Betancourt. Para ello, Autodesk Inventor Professional 2016 presenta la gran ventaja de aportar un paquete de programas encaminado a este estudio.

En primer lugar, para proceder con el análisis de tensión es necesario acudir al menú 'Entornos' (Figura 2.93) y seleccionar el botón 'Análisis de tensión' (Figura 2.94).

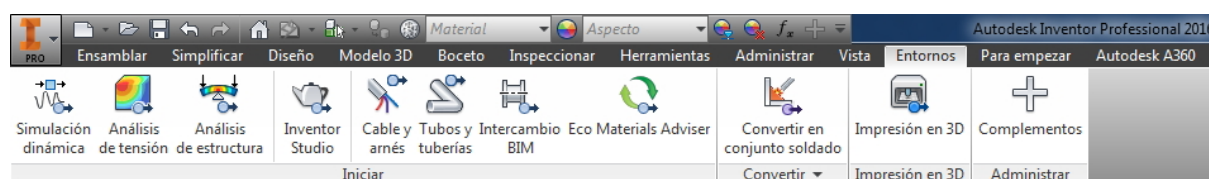


Figura 2.93. Menú 'Entornos'.



Figura 2.94. Botón 'Análisis de tensión'.

Una vez seleccionada la opción del análisis de tensión, se despliega una nueva barra de herramientas, donde la mayor parte de las herramientas están desactivadas, hasta que se crea la simulación en el submenú 'Administrar' (Figura 2.95). Al pulsar el botón 'Crear simulación' aparece un cuadro de diálogo donde se presentan los parámetros de la simulación (Figura 2.96). Los parámetros que aparecen por defecto, incluida la tolerancia entre los contactos de las piezas, son adecuados, por lo que se adoptan para el análisis.



Figura 2.95. Submenú 'Administrar'.

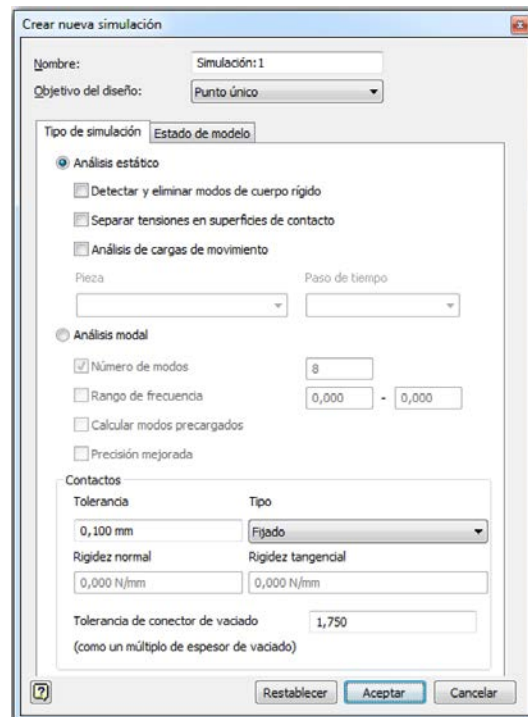


Figura 2.96. Cuadro de diálogo 'Crear nueva simulación'.

Aceptadas dichas condiciones, en la parte izquierda de la pantalla aparece un nuevo árbol de operaciones que muestra los pasos que hay que dar para llevar a cabo dicho análisis (Figura 2.97).

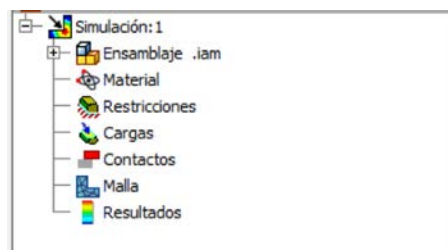


Figura 2.97. Árbol de operaciones de la simulación.

2.4.2.1. Preprocesado

El modelo CAD que había sido ensamblado, antes de ser abierto en la simulación, puede ser adaptado para el proceso de análisis CAE; a esto se refiere el término ‘pre-procesado’. Los mecanismos ideados por Agustín de Betancourt son mecanismos con una gran cantidad de elementos, y para hacer un análisis completo de ellos, serían necesarios unos requerimientos computacionales muy altos. Una solución que ayuda a disminuir estos requerimientos es la simplificación de los modelos, aunque evidentemente, la simplificación del modelo no debe afectar a los resultados del análisis, y por ello, este paso debe ser debidamente analizado y justificado.

La principal manera de simplificar el modelo para su posterior análisis es excluir del mismo a todos aquellos elementos que no tienen una función estructural. Los elementos no estructurales no son objeto del análisis estático del modelo, y por lo tanto, distraen al programa al tratarlos como parte de la estructura ya que calcula sus contactos y la acción de la gravedad sobre ellos, debiendo generar una malla, etc. Pero, por otra parte, la eliminación de estos elementos no puede hacerse a la ligera. Es fundamental distinguir si al excluirlos deben ser sustituidos por cargas puntuales o si simplemente se pueden eliminar del análisis. En caso de ser sustituidos por cargas, como se verá más adelante, habrá que determinar su tipología y su magnitud.

2.4.2.2. Asignación de materiales

El primero de los pasos es asignar el material y definirlo de la manera más aproximada posible. El software permite asignar el material en la fase de modelado; de hecho, la mayor parte de los elementos tienen definido su material en el momento de su creación. El módulo de simulación de Autodesk Inventor Professional es capaz de reconocer dichos materiales, y por lo tanto, no es necesario volver a definirlos. De todas formas, puede ocurrir que alguno no esté definido o que el material no sea apto para la simulación. En ese caso, al hacer click en la opción ‘Material’ aparecerán tanto los materiales utilizados de cada uno de los elementos como los que no ha logrado reconocer (Figura 2.98). En el caso de que haya algún elemento que sea necesario volver a definir se selecciona el elemento en cuestión y después se selecciona la opción ‘Asignar’ (Figura 2.99).

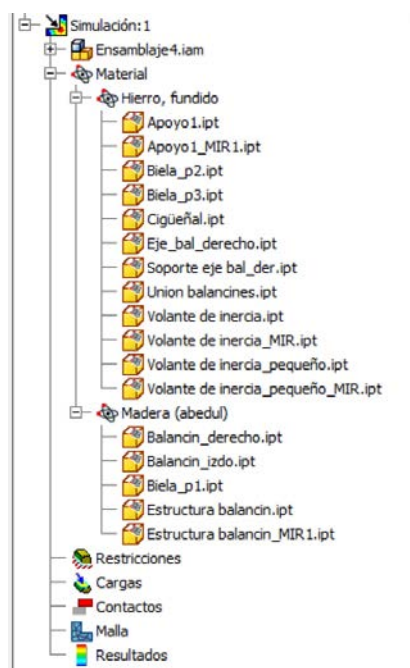


Figura 2.98. Árbol de operaciones mostrando los materiales asignados a los diferentes elementos.



Figura 2.99. Botón 'Asignar'.

La biblioteca de materiales de Autodesk Inventor Professional presenta una relación de materiales extensa, que puede completarse con otras que ofrece Autodesk en su página web. Cada material puede editarse de modo que se pueden redefinir sus propiedades físicas en caso de conveniencia o si se trabaja con materiales concretos de los que se conocen sus características específicas. Las características físicas del editor de materiales cambian dependiendo de si el material es isótropo (Figura 2.100) u ortótropo (Figura 2.101). En los modelos que se han realizado aparecen materiales de los dos tipos y se han tomado las características que facilita la biblioteca. Algo más delicado ha sido elegir la dirección apropiada en las piezas fabricadas con material ortótropo (madera), aunque eso se ha realizado en la fase de modelización. En éstas, la dirección principal debe coincidir con la dirección de la veta ya que esta dirección es la que tiene mejores propiedades físicas.

Editor de materiales: Hierro, gris	
<div> <div>Identidad</div> <div>Aspecto</div> <div>Físico</div> </div>	
▼ Información	
Nombre	Hierro - Gris
Descripción	Activo estructural metálico.
Palabras clave	estructural,metal
Tipo	Metal
Subclase	Hierro
Origen	Autodesk
URL de origen	
▼ Térmico básico	
Conductividad térmica	2,100E+01 Con (m · K)
Calor específico	0,540 J / (G · ° C)
Coefficiente de dilatación térmica	12,000 µm / (m · ° C)
▼ Mecánico	
Comportamiento	Isótropo
Módulo de Young	90,000 GPa
Coefficiente de Poisson	0,30
Módulo cortante	36500,000 MPa
Densidad	7,150 g/cm³
▼ Resistencia	
Límite de elasticidad	119,000 MPa
Resistencia máxima a tracción	276,000 MPa
<input type="checkbox"/> Tratado térmicamente	
<div> <div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> <div> <div>Aceptar</div> <div>Cancelar</div> <div>Aplicar</div> </div> </div>	

Figura 2.100. Cuadro de diálogo 'Editor de materiales: Hierro, gris'.

Editor de materiales: Madera (roble)

Identidad **Aspecto** **Físico**

▼ Información

Nombre: Madera - roble
 Descripción: Activo estructural de madera.
 Palabras clave: estructural,madera
 Tipo: Madera
 Subclase:
 Origen: Autodesk
 URL de origen:

▼ Térmico básico

Calor específico: 1,200 J/(g · °C)
 Coeficiente de dilatación térmica X: 0,100 µm/(m·°C)
 Coeficiente de dilatación térmica Y: 0,100 µm/(m·°C)
 Coeficiente de dilatación térmica Z: 0,100 µm/(m·°C)
 Conductividad térmica X: 1,000E+00 Con (m · k)
 Conductividad térmica Y: 1,000E+00 Con (m · k)
 Conductividad térmica Z: 1,000E+00 Con (m · k)

▼ Mecánico

Comportamiento: Ortótropo
 Densidad: 0,760 g/cm³
 Módulo de Young X: 0,000 MPa
 Módulo de Young Y: 0,000 MPa
 Módulo de Young Z: 0,000 MPa
 Coeficiente de Poisson X: 0,37
 Coeficiente de Poisson Y: 0,43
 Coeficiente de Poisson Z: 0,62
 Módulo cortante X: 0,000 MPa
 Módulo cortante Y: 0,000 MPa
 Módulo cortante Z: 0,000 MPa

▼ Resistencia

Especies: Quercus
 Grado de fuerza:
 Plegado: 99,636 MPa
 Compresión paralela a la veta: 41,000 MPa
 Compresión perpendicular a la veta: 5,200 MPa
 Cortante paralelo a la veta: 11,900 MPa
 Tracción paralela a la veta: 100,000 MPa
 Tracción perpendicular a la veta: 3,700 MPa
 Módulo de media: 0,000 MPa
 Construcción: Natural
 Límite de elasticidad: 46,600 MPa
 Resistencia máxima a tracción: 5,500 MPa

Aceptar Cancelar Aplicar

Figura 2.101. Cuadro de diálogo 'Editor de materiales: Madera (roble)'.

2.4.2.3. Condiciones de contorno

El siguiente paso es definir las condiciones de contorno del conjunto. En la Figura 2.102 se puede observar que el software proporciona tres tipos de restricciones: fijas, de pasador y sin fricción.



Figura 2.102. Submenú 'Restricciones'.

Las primeras en definirse son las superficies que tienen una restricción fija, esto es, aquellas que sirven de apoyo del elemento y están empotradas. En primer lugar, se selecciona el tipo de restricción y después se señalan las superficies a las que imponemos esta condición. Las siguientes en definirse son las de rodadura (ejes, rodamientos, etc...). El proceso es similar al anterior, eligiéndose la restricción y posteriormente la cara cilíndrica a la que se quiere aplicar esta restricción. Por último, las que no tienen fricción, es decir, aquellas que tienen solamente limitado su movimiento en una de las direcciones. De nuevo, se elige la restricción y posteriormente se selecciona la cara en cuya dirección normal está impedido el movimiento, pero que presenta libertad para moverse sin fricción en una dirección tangencial. Cada una de las restricciones aparece reflejada en el árbol de operaciones como muestra la Figura 2.103.



Figura 2.103. Árbol de operaciones mostrando las restricciones aplicadas.

2.4.2.4. Fuerzas aplicadas

Una vez definidos los contactos es el turno de las fuerzas a aplicar sobre el modelo. En este paso hay que definir cada una de las acciones externas que van a actuar sobre el mecanismo originando su sollicitación. Las acciones se pueden clasificar en cinco tipos bien diferenciados, tal y como se refleja en la Figura 2.104 el menú de cargas: fuerza, gravedad, presión, rodamiento, momento y gravedad.



Figura 2.104. Submenú 'Cargas'.

Las fuerzas son las acciones puntuales externas que se aplican en un punto (el punto medio de una arista o en un vértice). Para definir la fuerza, más allá de localizarla hay que darle una dirección, un módulo y un sentido. Este proceso se realiza en el editor de fuerzas (Figura 2.105). De un modo análogo se definen las presiones, los momentos de inercia y las fuerzas que pueden incidir en un rodamiento. El editor permite localizar la superficie sobre la que se aplican, su sentido y su magnitud.



Figura 2.105. Cuadro de diálogo 'Editar fuerza'.

Las presiones son acciones que se aplican sobre una superficie de modo uniforme, y perpendiculares a la cara sobre la que actúa. El cuadro de diálogo para editar la presión sólo permite determinar la magnitud (Figura 2.106).

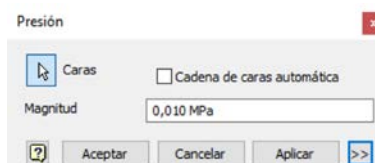


Figura 2.106. Cuadro de diálogo 'Presión'.

El tercer tipo de acción que se puede definir es la correspondiente a la carga axial que puede recibir un eje o un rodamiento. Para definir esta acción se selecciona en primer término la superficie curva donde va a tener lugar el esfuerzo, y posteriormente, la dirección axial desde donde viene la carga externa. Por último, hay que determinar la magnitud de la carga como en ocasiones anteriores (Figura 2.107).

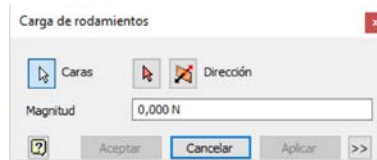


Figura 2.107. Cuadro de diálogo 'Carga de rodamientos'.

Otro tipo de acción externa que puede recibir el modelo es un momento aplicado en un eje. Este momento, generado por una fuerza a una distancia del eje, se mide en Nmm. El editor del momento, cuyo cuadro de diálogo aparece en la Figura 2.108, permite definir el mismo determinando la superficie del eje de giro sobre el que actúa el momento, la dirección del momento y la magnitud del mismo.



Figura 2.108. Cuadro de diálogo 'Momento'.

La gravedad que afecta al modelo es la única acción que siempre actúa y se define de manera diversa a las cargas mencionadas anteriormente. La manera más precisa de definir el vector gravedad es incluir las coordenadas de este vector en el cuadro de diálogo 'Editar gravedad' (Figura 2.109). Lo más común es definirlo en sentido negativo del eje Z y con el módulo estandarizado. Si se define de este modo, el programa lo representa aplicado a su centro de gravedad. Sin embargo, otra forma de definirlo es como vector normal a una cara seleccionada, y en este caso, la gravedad viene representada como una fuerza aplicada a dicha cara.

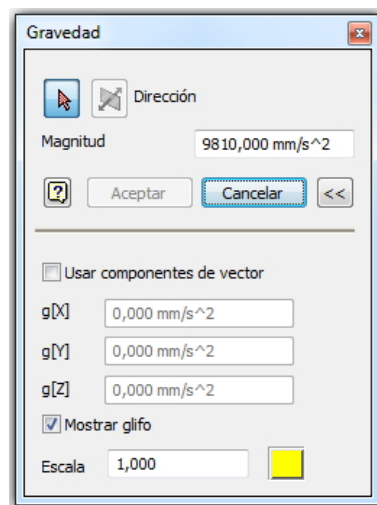


Figura 2.109. Cuadro de diálogo 'Editar gravedad'.

Una vez definidos los distintos tipos de cargas, el software ofrece la posibilidad de representarlas en el modelo para visualizar donde están localizadas las distintas acciones (Figura 2.110). Accionado este botón el modelo aparece con los vectores como aparece en la Figura 2.111.



Figura 2.110. Botón para representar las diferentes cargas.

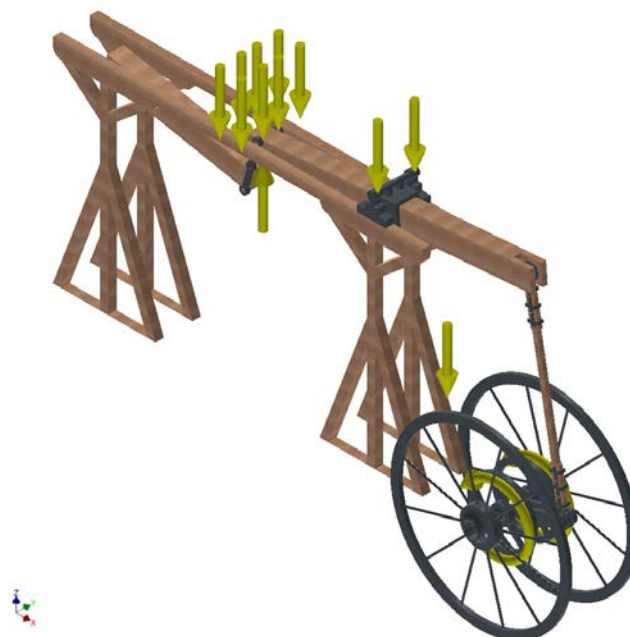


Figura 2.111. Modelo con las cargas representadas.

Finalmente, la Figura 2.112 representa el árbol de operaciones con las distintas cargas que se acaban de definir.

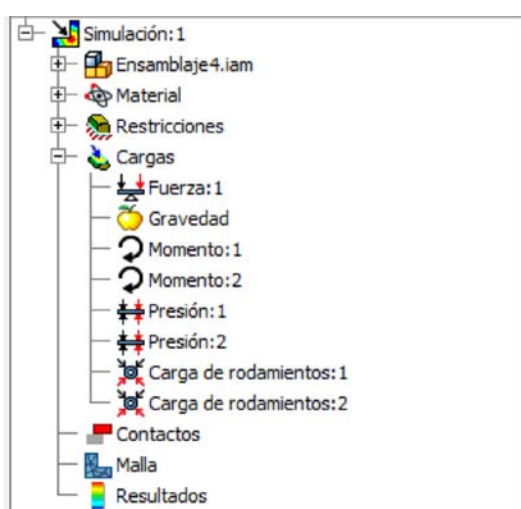


Figura 2.112. Árbol de operaciones mostrando las diferentes cargas aplicadas al modelo.

En este punto hay que establecer los contactos entre los distintos elementos del ensamblaje. Autodesk Inventor Professional genera contactos automáticamente entre piezas cuya geometría juzga que están en contacto. En principio, si el modelo está perfectamente definido geométricamente, estos contactos automáticos son todos los que el ensamblaje tiene. De todos modos, algunas posiciones y algunas geometrías son algo complejas, y no es extraño que haya que definir manualmente algunos contactos concretos que la simulación no es capaz de reconocer, debido a la tolerancia con la que se ha definido el modelo. Por lo tanto, para definir los contactos, lo primero que se debe hacer es generar los contactos automáticos del submenú de contactos (Figura 2.113). En segundo lugar, hay que comprobar que todos los contactos están definidos, y para ello se intenta definir manualmente el contacto entre superficies cuyo contacto sea aparentemente más complicado (Figura 2.114). Si ese contacto ya está definido automáticamente, el programa no deja volver a definirlo. De todos modos, recorriendo el cursor por el árbol de operaciones, se puede observar en tiempo real cada uno de los contactos, de manera que esta labor de reconocimiento no es tan larga.

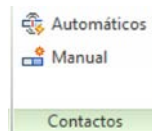


Figura 2.113. Submenú 'Contactos'.

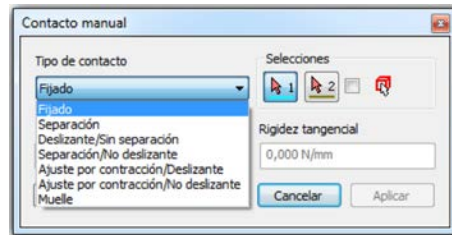


Figura 2.114. Cuadro de diálogo 'Contacto manual'.

Si el contacto no estuviera definido, como se aprecia en la Figura 2.115, se define el tipo de contacto que existe entre las posibilidades que proporciona el editor de contactos y, automáticamente, se agrega a los contactos que aparecen en el árbol de operaciones (Figura 2.116).



Figura 2.115. Ejemplo de contacto manual.

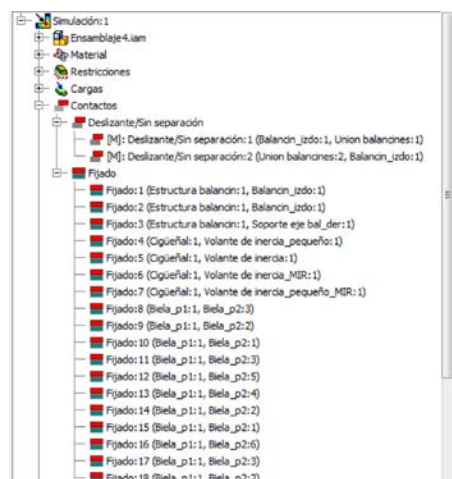


Figura 2.116. Árbol de operaciones mostrando los contactos establecidos.

2.4.3.5. Discretización o mallado

El último paso antes de ejecutar la simulación es la discretización del dominio computacional, y para ello se utiliza el submenú 'Malla' (Figura 2.117).

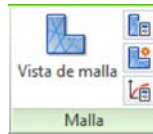


Figura 2.117. Submenú 'Malla'.

Autodesk Inventor Professional proporciona una malla automática cuyo propósito es adecuarse de la manera más exacta a la geometría del modelo. El mallado es una simplificación geométrica para poder procesar el conjunto como un elemento unitario, dividiéndolo en elementos que posteriormente estudiará. Esta simplificación se realiza a través de tetraedros que simulan el volumen del modelo. Al pulsar el botón de 'Vista de malla' se despliega el cuadro de diálogo para configurar la malla (Figura 2.118). Los valores que se proponen por defecto son en general aceptables, aunque pueden ser insuficientes en determinados lugares donde las piezas tienen una geometría menos sencilla y mucho volumen. En estos casos es necesario realizar un mallado de mayor precisión.

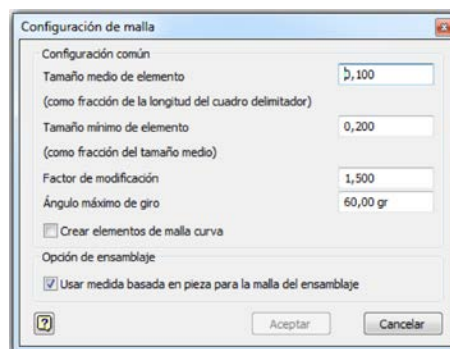


Figura 2.118. Cuadro de diálogo 'Configuración de malla'.

Para realizar este mallado se usa la herramienta de control de malla local (Figura 2.119). En primer lugar, se selecciona la cara o arista en la que se juzga que la malla no se ajusta suficientemente a la geometría del modelo. A continuación, se define el tamaño del lado del tetraedro que se quiere imponer en esa región. Por defecto, la malla suele tomar el 10% del tamaño del elemento, pero como se ha comentado, en algunos lugares es insuficiente y los resultados del análisis pueden presentar errores. Los lugares donde se encuentra más solicitado el modelo suelen ser precisamente puntos singulares, y si la variación de la malla en ese lugar es grande, el contacto no se definirá correctamente.



Figura 2.119. Cuadro de diálogo 'Control de malla local'.

La Figura 2.120 muestra un ejemplo donde se ha variado el tamaño de la malla en un lugar donde se concentran los esfuerzos de dos elementos de geometría algo compleja. Una vez definida la malla en una región hay que actualizar la vista de malla para que se represente correctamente. Terminados los ajustes de la malla, el árbol de operaciones muestra las regiones en las que se ha cambiado manualmente el mallado (Figura 2.121).

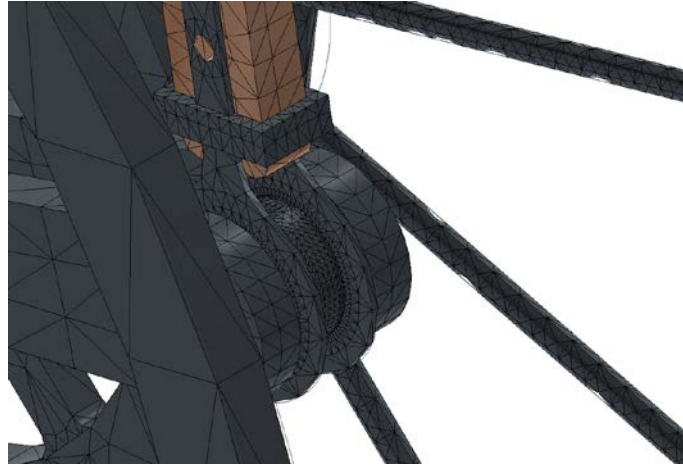


Figura 2.120. Vista de región a la que se ha cambiado la malla.

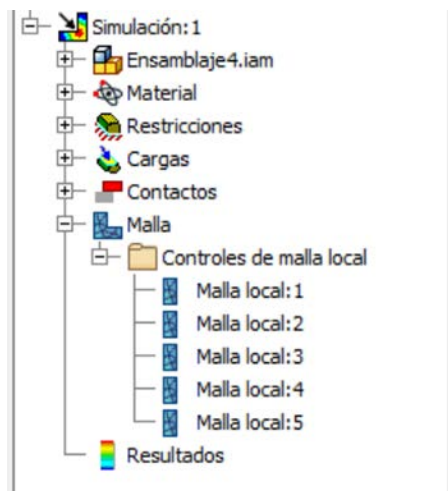


Figura 2.121. Árbol de operaciones mostrando los controles de malla local.

2.4.2.6. Resultados

Terminados los pasos precedentes, el software tiene los datos necesarios para llevar a cabo el análisis de tensión del modelo. Para efectuar dicho análisis hay que ejecutar la simulación pulsando el botón de simulación (Figura 2.122). El análisis de tensión, que ejecuta automáticamente el software, tiene una serie de parámetros por defecto que también pueden regularse para dar un resultado más preciso. Por lo tanto, previamente a la ejecución de la simulación, hay que configurar el análisis de tensión (Figura 2.123).

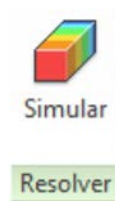


Figura 2.122. Botón 'Simular'.



Figura 2.123. Botón 'Configuración de análisis de tensión'.

Una vez pulsado el botón, aparece un cuadro de diálogo con 3 pestañas. La primera de ellas, 'General' (Figura 2.124), permite definir los contactos que genera automáticamente. Para ello se

regula el grado de tolerancia, distancia mínima que detecta el software, y el tipo de contacto que define por defecto. Además, se define cómo presentar los componentes excluidos de la simulación y el tamaño del glifo en relación a su módulo.

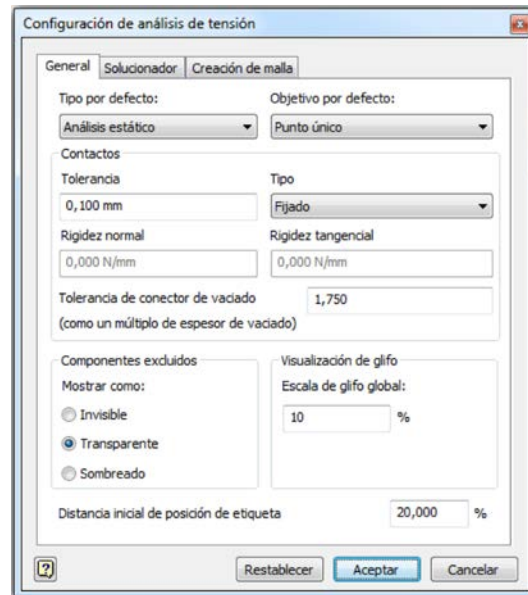


Figura 2.124. Cuadro de diálogo 'Configuración de análisis de tensión'. Pestaña 'General'.

La pestaña 'Solucionador' (Figura 2.125), permite modificar los criterios de convergencia de resultados. El análisis por elementos finitos puede realizarse en más de un ciclo, estableciendo una comparación entre un resultado y los anteriores. Si ese resultado no varía en más de un 10% el análisis se detiene mostrando los resultados. Si la diferencia es mayor, sigue refinando el resultado hasta su convergencia. No se aconseja un número de refinados superior a 5, ya que el cálculo se ralentiza demasiado.

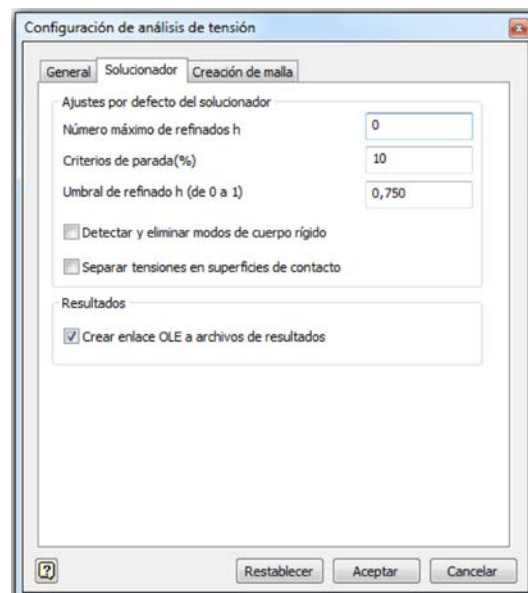


Figura 2.125. Cuadro de diálogo 'Configuración de análisis de tensión'. Pestaña 'Solucionador'

La tercera pestaña 'Creación de malla' (Figura 2.126), sirve para modificar la creación de la malla por defecto, aspecto ya abordado al configurar la malla.

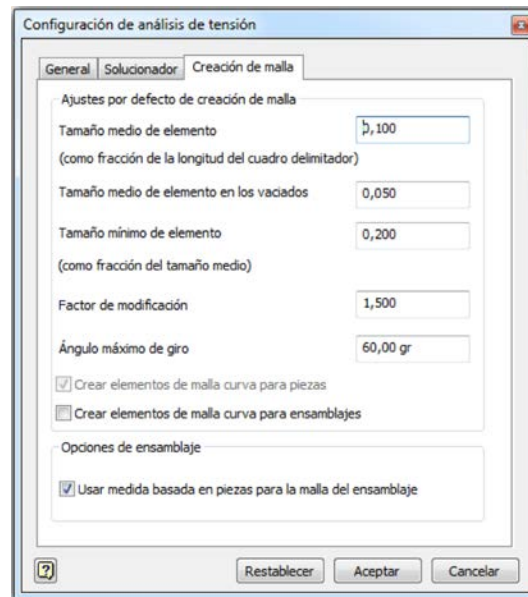


Figura 2.126. Cuadro de diálogo 'Configuración de análisis de tensión'. Pestaña 'Creación de malla'.

Terminada la configuración, se presiona el botón de simular y se abre el cuadro de diálogo de la simulación (Figura 2.127). Si el programa juzga que todos los elementos están bien definidos e integrados en el ensamblaje, el cuadro de diálogo no presenta ningún aviso. Si presenta algún aviso hay que resolver las carencias antes de ejecutar la simulación.

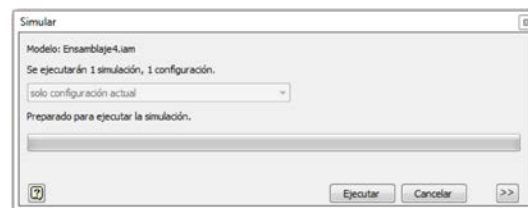


Figura 2.127. Cuadro de diálogo 'Simular'.

Tras ejecutar la simulación, en el árbol de operaciones se muestran los resultados calculados en el análisis de tensiones (Figura 2.128).

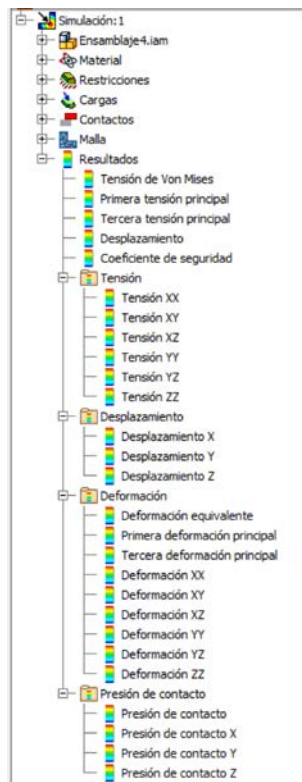


Figura 2.128. Árbol de operaciones mostrando los resultados obtenidos tras la simulación.

Cada una de las ramas del árbol de operaciones presenta un resultado gráfico referente a alguno de los datos del análisis de tensiones: tensión de Von Mises, tensiones en las distintas direcciones, desplazamientos, deformaciones (equivalente y en las distintas direcciones), presiones de contacto y coeficiente de seguridad. Los distintos datos aparecen gráficamente representados sobre el propio modelo como se puede observar en la Figura 2.129.

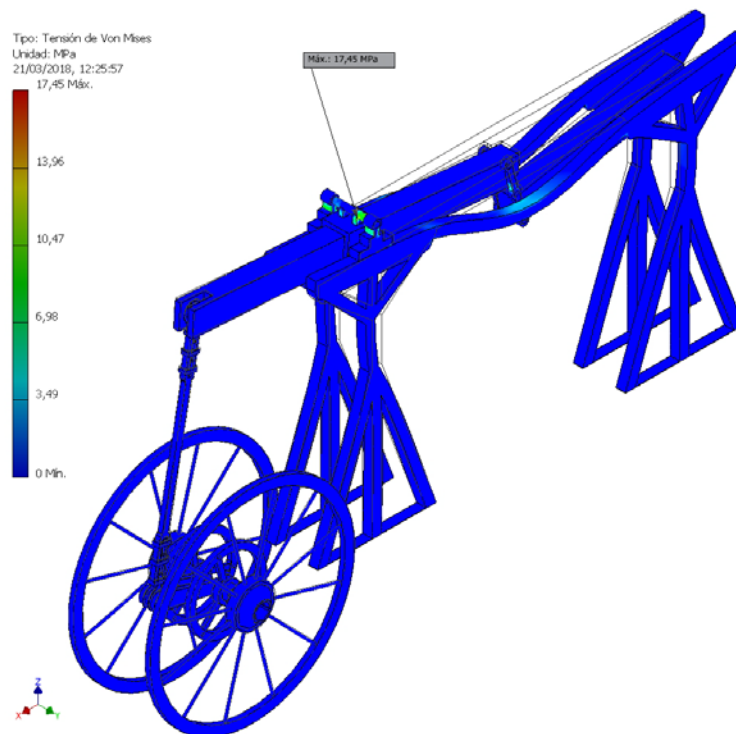


Figura 2.129. Resultado del análisis de tensiones (Tensiones de Von Mises).

El modelo aparece representado con una escala de colores que puede ser modificada para presentar, de una manera más visual, los resultados del análisis. Para modificar la escala de colores o para presentar los puntos máximo y mínimo, Autodesk Inventor Professional presenta el submenú 'Mostrar' (Figura 2.130). La escala de colores se puede ajustar a varios criterios.



Figura 2.130. Submenú 'Mostrar'.

Configurar la barra de colores es determinante para presentar los resultados de una manera gráfica aportando información relevante. El criterio que el software toma por defecto, es el que presentan los puntos de intensidad máxima y mínima, pero no siempre es el criterio más aconsejable para seguir. Para ello, se usa el menú de configuración de la barra de herramientas (Figura 2.131).

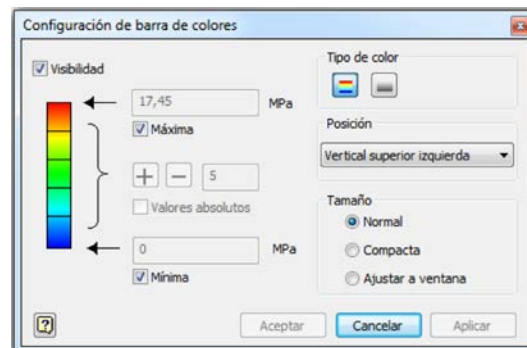


Figura 2.131. Cuadro de diálogo 'Configuración de barra de colores'.

A partir de los resultados obtenidos se elaborarán las conclusiones del análisis de tensiones del modelo.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

Este capítulo presenta los resultados obtenidos y discusiones de los mismos, tras aplicar las metodologías de diseño e ingeniería asistidas por ordenador, expuestas en el capítulo anterior al material objeto de estudio.

3.2. Máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos

3.2.1. Introducción

Los materiales para la investigación realizada sobre la invención histórica, han sido únicamente los que aparecen en el sitio web del proyecto digital Betancourt (Proyecto Digital Betancourt), consistentes en dos láminas de la máquina (Betancourt y Molina, 1789).

Agustín de Betancourt realizó un viaje a Inglaterra durante su segundo año en París (1788), que tenía como objeto entrevistarse con James Watt y Matthew Boulton para hablar de la máquina de vapor recientemente inventada y patentada por ambos. La estancia se prolongó durante algunas semanas y tuvo la oportunidad de conocer de primera mano los avances industriales que se estaban llevando a cabo en las Islas Británicas. El viaje, aunque con algunos incidentes, tuvo el resultado deseado y Betancourt fue capaz, semanas después, de reproducir la máquina de vapor de doble efecto que había visto en Londres. Pero de Inglaterra, Betancourt también se trajo una grata impresión del desarrollo de la ingeniería hidráulica que tenía el país. Fruto de esas reflexiones, en 1789 diseñó una máquina para desaguar los terrenos pantanosos que se trajo a España para engrosar el elenco de máquinas del Real Gabinete del Buen Retiro, y del que posteriormente se publicó una memoria (García Diego, 1988).

Lo comentado anteriormente muestra que la invención es de 1789, y como se refleja en la web del Proyecto Digital Betancourt, aparece en el manuscrito 1487 cuya digitalización fue proporcionada por la Escuela Nacional de Puentes y Caminos de la Universidad ParisTech. En dicho expediente, tan sólo aparecen dos láminas (planos). En la primera lámina aparecen dos proyecciones diédricas de la invención (alzado y perfil), junto a una perspectiva caballera, y en la segunda, aparecen reflejados una proyección superior del sistema de rotación y una perspectiva caballera del sistema regulador de llenado de las artesas.

Como se observa, debido a la ausencia de información de detalle tanto gráfica como descriptiva, ha sido necesario adoptar unas hipótesis geométricas y dimensionales, así como de movimiento para que el conjunto funcionara perfectamente.

En primer lugar, para obtener el modelo 3D se ha utilizado como metodología la restitución digital de dicho modelo utilizando como herramienta Autodesk Inventor Professional 2016, software paramétrico de diseño asistido por ordenador desarrollado por Autodesk (Shih, 2015).

Seguidamente, se muestra en detalle el proceso seguido en el modelado tridimensional y su documentación geométrica, explicando las restricciones aplicadas y las hipótesis adoptadas para que el diseño de la invención histórica fuera coherente.

3.2.2. Diseño Asistido por Ordenador

El proceso de modelado tridimensional ha sido bastante complejo por la ausencia de información de detalle. Las dos láminas de la invención están dibujadas sin escala, y por tanto, en dicho proceso se ha respetado la proporcionalidad midiendo sobre dichas láminas, para obtener un modelo CAD 3D fidedigno. Por ello, se han adoptado diversas escalas gráficas para

que las dimensiones de los elementos del conjunto fueran las mismas en las dos láminas, y dieran coherencia al mismo, permitiendo posteriormente un modelo consistente. No se trata por tanto, de dibujos actuales en los que se incorpore información sobre procesos de fabricación o montaje, pues no estaban sujetos a un proceso de normalización, sino que se trata de diseños conceptuales que presentaban deficiencia de información técnica e incongruencia en las dimensiones de algunos elementos. En algunos casos dichas invenciones nunca fueron construidas.

Por estos motivos sobre el modelo se han tomado decisiones arbitrarias a la hora de adoptar ciertas medidas y respecto a las restricciones de movimiento (grados de libertad) entre los diferentes elementos del conjunto, sobre todo en los elementos que componen el sistema regulador de llenado de las artesas. La unión entre las piezas es de tipo fijo o de tipo móvil (si permiten girar). En el modelo 3D, no se ha utilizado ningún material normalizado (estandarizado), ya que en la época todas las piezas metálicas eran de fabricación artesanal, y por ello, tampoco se ha realizado el cálculo de tolerancias entre las piezas ensambladas.

A diferencia de otros software paramétricos utilizados, el proceso de modelado con Autodesk Inventor Professional permite crear de forma paramétrica los componentes individualmente (.ipt), que pueden ser modificados en 2D con herramientas de la familia Autodesk como AutoCAD e importar diseños realizados previamente, para posteriormente formar el ensamblaje del conjunto (.iam) a base de restricciones de contacto y de movimiento en los componentes individuales, es decir, limitando los grados de libertad de los mismos. La Figura 3.1 muestra una perspectiva isométrica del modelo 3D obtenido con técnicas CAD de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos.



Figura 3.1. Perspectiva isométrica del modelo 3D.

Como se puede apreciar, la invención consta de una estructura principal que sirve de soporte a un sistema de rotación vertical de las aspas donde incide el viento y a un sistema regulador de llenado de los recipientes o artesas del agua drenada.

Asimismo, la Figura 3.2 muestra un plano de conjunto con indicación de los diferentes elementos

o marcas y su lista, y la Figura 3.3 muestra una perspectiva estallada o de montaje de los diferentes elementos que componían el ingenio, así como la dirección y orden de ensamblaje de los mismos.

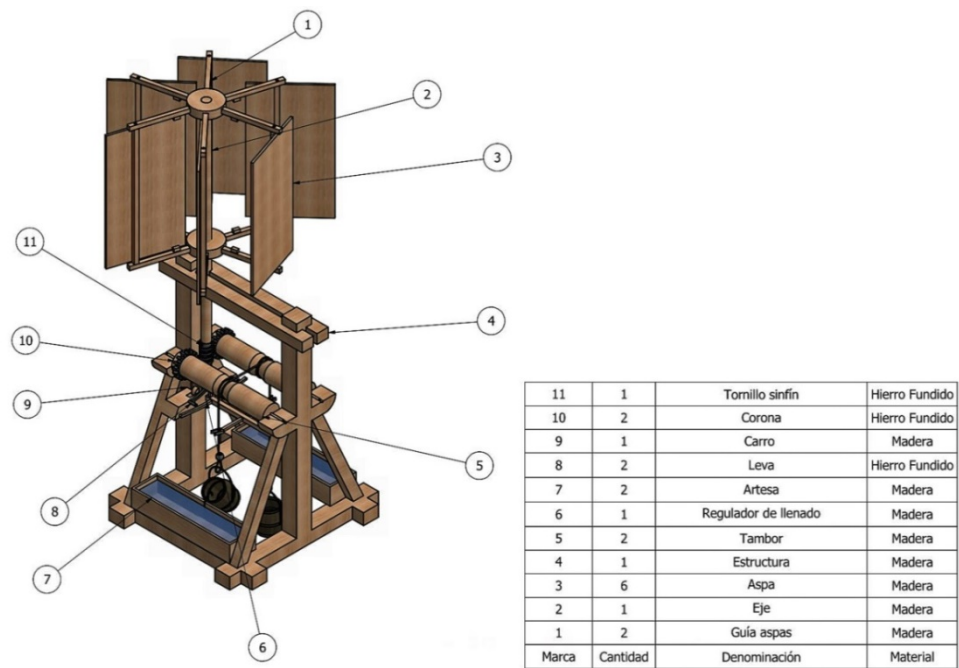


Figura 3.2. Plano de conjunto del modelo 3D.

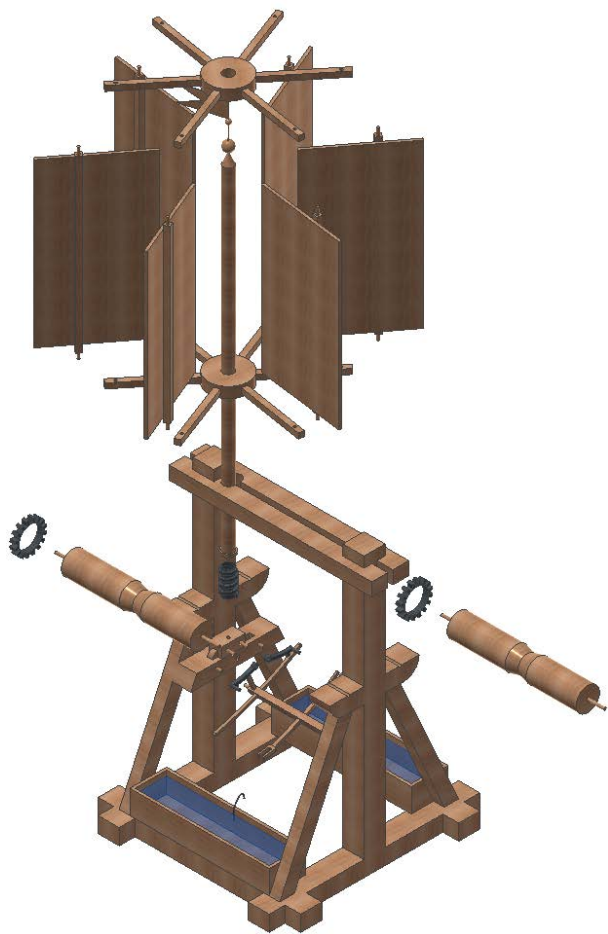


Figura 3.3. Perspectiva estallada del modelo 3D.

3.2.2.1. Funcionamiento

El funcionamiento del ingenio se podría dividir en dos partes: el mecanismo rotor y el mecanismo elevador. El mecanismo rotor estaría compuesto por las aspas, el eje principal terminado en un tornillo sinfín en su parte inferior y la guía de las aspas. Así pues, cuando el viento incide en las aspas (placas de madera), éstas no tienen un comportamiento solidario con el eje principal ya que pueden girar sobre un eje excéntrico con respecto al eje principal gracias a sus guías. Esto permite que la oposición de las aspas a la dirección, se produzca sólo en un lado del mecanismo, favoreciendo el giro, como se puede apreciar en la Figura 3.4.

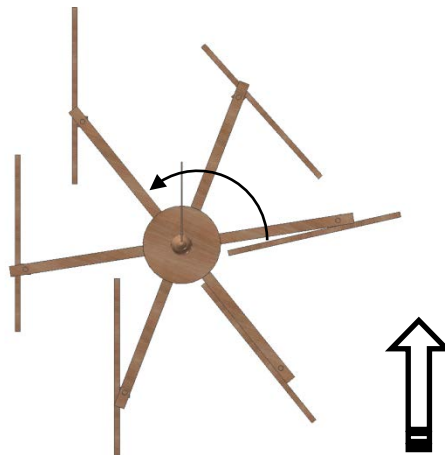


Figura 3.4. Detalle del mecanismo rotor que produce el movimiento al conjunto.

Por otro lado, se encuentra el mecanismo elevador. El movimiento del eje hace que su tornillo sinfín gire haciendo girar dos ruedas dentadas o coronas. Éstas a su vez accionan a dos tambores cilíndricos sobre los que se encuentran enrolladas dos maromas o cuerdas que hacían subir o descender los dos cangilones de recogida del agua (Figura 3.5).

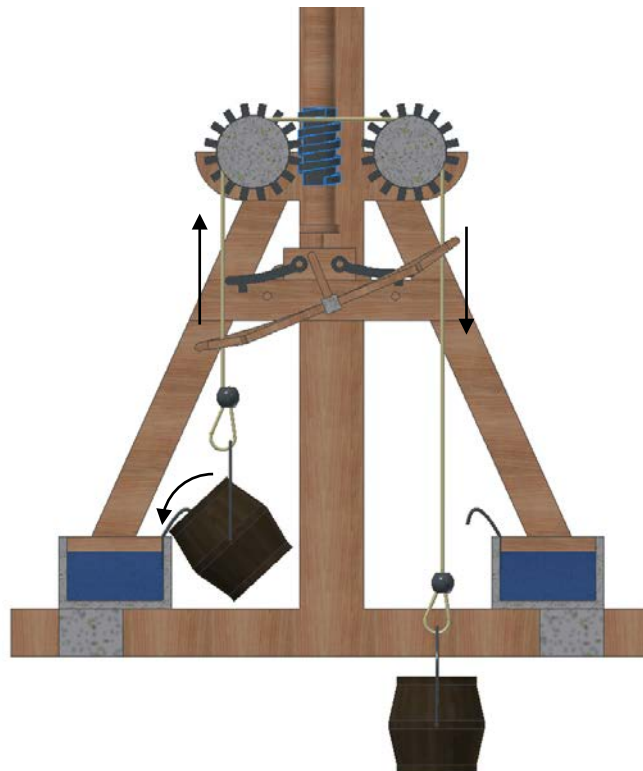


Figura 3.5. Detalle del mecanismo elevador que hace subir y bajar los cubos.

El cangilón lleno vierte su contenido en la artesa y sigue subiendo hasta que el tope (bola metálica en la maroma) choca con el regulador de llenado haciéndolo subir. Ese movimiento le hace girar hacia el otro lado, moviendo la leva que desplaza el carro sobre el que se apoya el eje principal, y por tanto, desplazando dicho eje. El tornillo sinfín se separa de la corona que hacía subir la maroma y se desplaza hacia la otra corona. Al acoplarse a la otra corona, ésta empieza a girar provocando un movimiento inverso, por lo que el cangilón que estaba arriba comienza a descender y el que está abajo, lleno de agua, comienza su ascenso.

3.2.2.2. Modelado de la estructura bastidor

El ingenio eólico para hacer ascender el agua de los terrenos pantanosos está soportado por un bastidor de madera de sección cuadrada como se puede apreciar en la Figura 3.6. Este bastidor descansa sobre un cuadrado de madera que recibe todas las tensiones de las estructuras superiores, y sobre el cual apoyan dos columnas apuntaladas por dos vigas en ángulo. Ambas están unidas en su parte superior por dos vigas horizontales con una pequeña separación que presenta un taladro para insertar el eje vertical de rotación.

Asimismo, se han modelizado de manera independiente del armazón dos artesas que recogen el agua que vierten los cangilones, en las cuales existe un alambre metálico que sirve para girar el cangilón lleno, y que permite su vertido sobre la propia artesa. Sin embargo, a pesar de estar estos elementos sobre el armazón, no tienen una función estructural y por tanto, no reciben tensiones del resto de elementos.

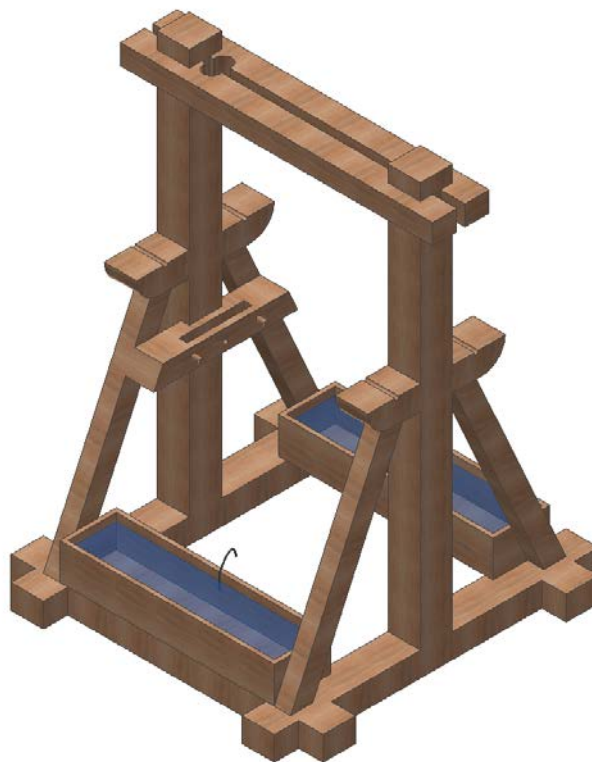


Figura 3.6. Estructura bastidor.

La Figura 3.7 detalla otro elemento incluido en el armazón, y es una viga horizontal acoplada a la columna más cercana al eje vertical, y que presenta una perforación en su parte superior. Este elemento es la guía de un carro de madera al que más adelante se hará referencia, y que facilita el movimiento de forma horizontal del eje vertical. Por último, en la parte donde se unen las vigas en ángulo con las columnas se aprecian sendos apoyos de madera sobre los que van a descansar dos tambores cilíndricos rematados con dos coronas o engranajes rectos que son los

que transformarán el movimiento horizontal en otro vertical. Estos elementos han sido modelizados solidariamente al bastidor que sostiene toda la estructura, ya que sí reciben tensiones de diversos elementos, tanto de la estructura superior como las generadas en el proceso de carga de agua de los cangilones.



Figura 3.7. Detalle de base del carro y soporte de los tambores cilíndricos.

3.2.2.3. Modelado del mecanismo rotor

El mecanismo rotor es el elemento impulsor de todo el ingenio eólico, y en él se puede apreciar la originalidad y espíritu pragmático del ingeniero español. Los molinos eólicos de eje vertical son una variedad de molinos poco común en Europa, aunque ciertamente se conocían desde muy antiguo. El mecanismo de rotación vertical ingeniado por Betancourt consta de un eje vertical que termina en su parte inferior en un sencillo tornillo sinfín unido solidariamente a dicho eje vertical.

Por otra parte, al eje se le acoplan dos guías, una superior y otra inferior cuya misión es albergar una serie de aspas rectangulares (Figura 3.8). Las aspas están acopladas a las guías mediante pernos cilíndricos que se encajan en los taladros no pasantes que presentan las mismas (Figura 3.9), siendo estos elementos modelizados independientemente unos de otros. El eje vertical se mueve solidariamente con las guías ya que están encajadas por un agujero cuadrado quedando unidas de forma fija y, por otro lado, las aspas tienen la libertad de girar sobre los pernos independientemente de la posición del eje vertical.



Figura 3.8. Aspa del mecanismo rotor.



Figura 3.9. Mecanismo rotor de la máquina eólica.

Como se puede observar, el mecanismo presenta en su parte superior una serie de detalles decorativos y una veleta que aparte de rematar el eje indica la dirección del viento, siendo todos los elementos del sistema de madera, a excepción del tornillo sinfín solidario al eje vertical que es de hierro fundido, debido a que este elemento engrana con los engranajes rectos de los tambores cilíndricos, y por lo tanto, necesitaría no verse afectado por el desgaste del contacto entre materiales distintos.

A la hora de elegir el tipo de madera para las distintas partes del mecanismo de rotación vertical, se ha tenido en cuenta que debe ser flexible ya que en esta parte de la estructura se van a presentar las principales deformaciones debido al pandeo. Sin embargo, respecto al modelo presentado por Betancourt hay una pequeña diferencia. Así pues, mientras que el ingeniero español propone una varilla como tope para limitar la rotación del aspa, el modelo recreado presenta pequeños topes en la misma guía de apenas unos centímetros. Estos presentan menor oposición al viento y, por lo tanto, un mejor aprovechamiento energético cumpliendo la misma función que podría tener una varilla que se tendiera desde la guía superior a la inferior. La función de estos topes es impedir que el aspa haga una rotación completa ya que, sin ellos el aspa no ofrecería resistencia al aire en ninguna posición y, por lo tanto, no habría movimiento de rotación del eje vertical (Figura 3.4).

3.2.2.4. Modelado del sistema regulador de llenado de las artesas

El sistema de llenado de artesas también es una muestra de originalidad e ingenio. Una vista general del sistema (Figura 3.10), muestra los principales componentes del mismo.

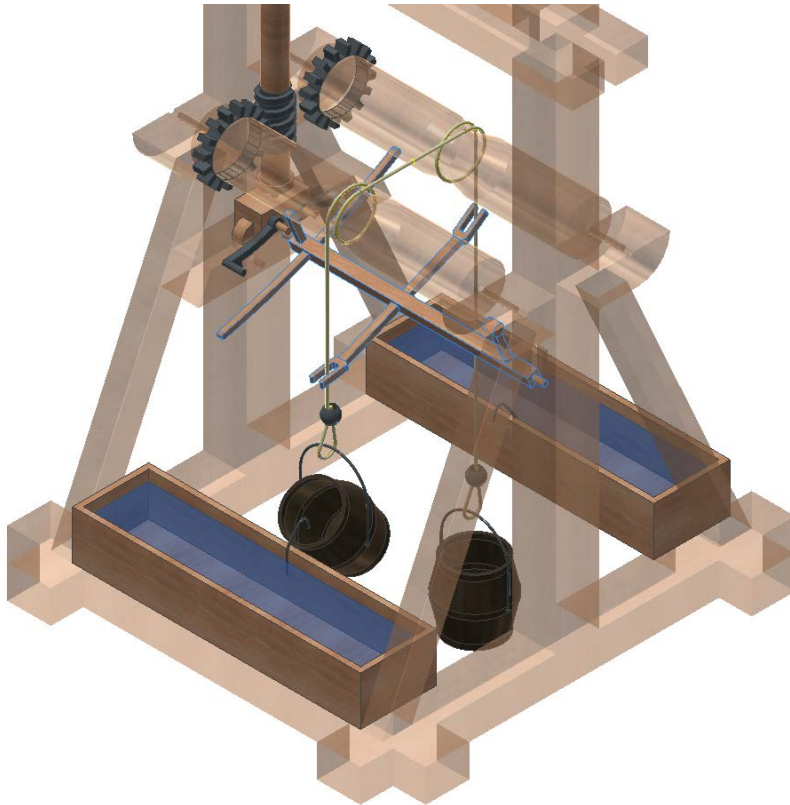


Figura 3.10. Detalle del sistema regulador de llenado de las artesas.

En primer lugar, se disponen 2 tambores cilíndricos cuya función es enrollar y desenrollar la maroma que asciende y desciende los cangilones con el agua. La Figura 3.11 destaca la posición perpendicular de los tambores cilíndricos respecto al eje vertical del sistema de rotación, transmitiendo éste el movimiento mediante el engranaje entre el tornillo sinfín y las coronas de los tambores cilíndricos (Figura 3.12).

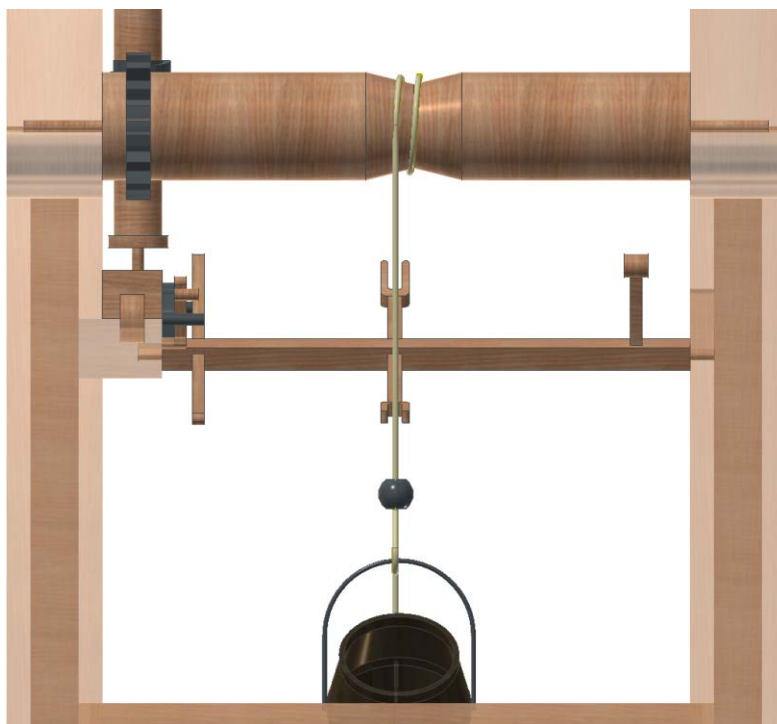


Figura 3.11. Vista de alzado del sistema regulador.

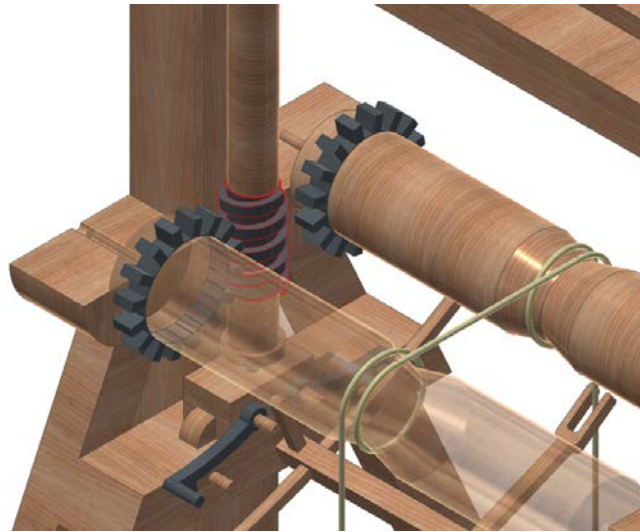


Figura 3.12. Detalle del tornillo sinfín, coronas y tambores.

Para el modelado de las coronas metálicas de los tambores cilíndricos se ha tenido en cuenta el paso del tornillo sinfín. Los datos facilitados en las láminas originales no permiten conocer en detalle las dimensiones del mismo, pero se ha utilizado uno compatible con las características y diámetro de los tambores cilíndricos.

De cara a facilitar una desmultiplicación entre el eje vertical y los tambores horizontales se ha establecido una relación de 1/16 permitiendo así que el movimiento vertical de ascensión de los cangilones sea menos violento, y produciendo menor desgaste en los elementos rotatorios. La maroma que está unida a los dos tambores cilíndricos no es solamente un elemento ascensor, sino que también transmite el movimiento de uno de los tambores al otro (Figura 3.12). Para que esta transmisión funcione correctamente la maroma debe abrazar completamente a cada tambor, y los cangilones deben tener suficiente peso como para que la maroma quede siempre tensa. Cuando se dan estas circunstancias, el giro horario de uno de los tambores es el causante del mismo en el otro.

Por otro lado, la invención posee una pieza poco común y de notable ingenio que tiene una función vital para el funcionamiento del mecanismo, como es el eje regulador (Figura 3.13). Este eje de sección cuadrada y sustentado horizontalmente por dos pernos que le permiten el movimiento de rotación, presenta varios elementos con funciones diversas y que actúan solidariamente. Por un lado, en el extremo izquierdo existe un péndulo que va a facilitar el movimiento en una dirección o su contraria; por otra parte, dos pinzas en su parte central y, por último, en el extremo derecho dos varillas en forma de arco sobre la que se posiciona un martillete. Asimismo, el conjunto del eje regulador ha sido modelado en una única pieza de madera, aunque sería susceptible de dividirse en diferentes elementos de cara a su fabricación o para atender al repuesto de alguno de ellos.

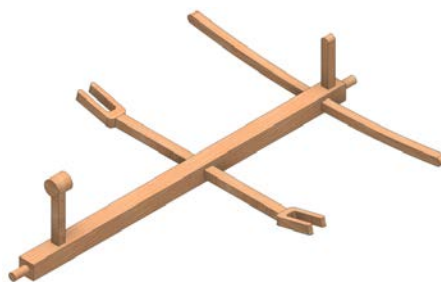


Figura 3.13. Eje regulador.

La finalidad de este elemento es detener la ascensión de uno de los cangilones y comenzar la ascensión del otro cangilón. La maroma pasa por el seno de la pinza y cuando el tope del cangilón (bola metálica) choca con la pinza el eje, empieza a rotar hacia la posición de equilibrio. Una vez alcanzada esta posición, la inercia de los péndulos facilita que el eje cambie de posición girando en sentido contrario. Las varillas que están situadas bajo el martillete elevan la leva que tiene enganchado el tope, liberando el movimiento del carro. Posteriormente, el mismo martillete golpea la leva contraria moviendo el carro desde el extremo en el que se encuentra hacia su contrario hasta que queda enganchado en el tope contrario. Sobre el carro se encuentra el extremo del eje vertical y, por lo tanto, el tornillo sinfín. Éste, al desplazarse al otro extremo, engrana con la corona del tambor contrario, transmitiendo su movimiento al tambor e iniciando el movimiento de ascenso del cangilón que está lleno de agua. Como se comentó anteriormente, la propia maroma facilitará que el otro cangilón vaya a su vez descendiendo hacia el fondo.

Aunque el carro donde se sitúan las levas es de madera, éstas debían ser metálicas (Figura 3.12) debido al desgaste del golpeteo constante, y en vistas a la necesidad de que conserve su libertad de giro. Asimismo, aunque este componente soporta el peso del eje vertical, es el propio movimiento rotatorio del dicho eje vertical el que facilita el desplazamiento del carro en una dirección y otra.

3.2.2.5. Ensamblaje final

La Figura 3.14 muestra el resultado final del conjunto ensamblado. Se trata de imagen fotorrealista lograda gracias al renderizado que proporciona Autodesk Inventor Studio, y que incorpora Autodesk Inventor Professional.



Figura 3.14. Imagen fotorrealista del ingenio ensamblado.

Una vez modeladas todas las piezas del ingenio sólo queda su ensamblaje. En primer lugar, se fija la estructura del bastidor que va a servir de apoyo a todos los mecanismos del ingenio, instalándose sobre el mismo, las artesas y los alambres que facilitan el desagüe. Por su parte, las artesas tienen restricciones de movimientos en los tres planos por lo que están perfectamente acopladas al bastidor (Figura 3.6).

En segundo lugar, para ensamblar el sistema de rotación vertical se coloca el carro sobre la pieza horizontal de la intersección de la columna y las vigas en ángulo. El carro tiene sus restricciones sólo en dos direcciones, puesto que la tercera dirección está libre para poder moverse longitudinalmente a lo largo de dicha pieza horizontal. Sobre el carro se sitúa el eje vertical de rotación con el tornillo sinfín en su extremo inferior, presentando ambos una restricción de coincidencia respecto al agujero del carro donde apoya el eje. Sobre el eje se insertan las guías, tanto la superior como la inferior, que están solidariamente unidas al eje y por lo tanto, tienen un ajuste de agujero completo. Los extremos exteriores de las guías presentan unos agujeros donde se disponen de forma alineada los pernos de los paneles rectangulares (Figura 3.9). Para disponerlos de este modo y permitir el giro, se establece una restricción de coincidencia y otra de plano. Por último, se activan los contactos entre el panel y la guía consiguiendo que el tope de la guía restrinja el giro completo del panel sobre las guías.

Asimismo, para ensamblar el mecanismo de llenado, se comienza por alinear el eje regulador del movimiento. El bastidor presenta unos agujeros respecto a los que se establece una coincidencia por agujero. Además de esta coincidencia hay que restringir uno de los planos de movimiento de manera que pueda girar sin moverse del sitio (Figura 3.10).

El siguiente paso consiste en fijar la posición de los tambores cilíndricos en sus guías. Para ello, se usa la misma restricción que en el caso anterior, pero además hay que activar los contactos que pueda tener con el tornillo sinfín. Esto es determinante para que la transmisión del movimiento se realice correctamente (Figura 3.12). A continuación, se insertan las levas en el carro con una restricción de coincidencia con los pernos del mismo, y otra respecto al plano del carro que apoya con la leva lo que le permite a la misma girar libremente en su perno. Una vez posicionada la leva también se activan los contactos entre ésta y el eje regulador ya que si no se hace, el martillete no puede empujar el carro.

La última fase del ensamblaje, es la colocación de la cuerda enrollada sobre los tambores cilíndricos y la colocación de los cangilones. El cangilón es independiente del asa que lo impulsa para poder rotar sobre él, y los extremos de aquella están ajustados permitiendo el giro sobre los taladros practicados para dicho fin en el cangilón. Asimismo, los contactos del cangilón también deben estar activados para que al chocar contra el alambre metálico gire vertiendo el agua. Por otro lado, el asa está solidariamente unida a la cuerda que tiene sólo un grado de libertad de movimiento (arriba-abajo), y finalmente, la bola metálica debe tener activados sus contactos para que, al chocar con la pinza del eje, éste se mueva girando hacia el lado contrario (Figura 3.10).

3.2.3. Ingeniería Asistida por Ordenador

3.2.3.1. Preprocesado

Antes de realizar la simulación del análisis estático del mecanismo conviene establecer una serie de simplificaciones que faciliten su ejecución sin que por ello el resultado del mismo se vea afectado. De este modo, las necesidades de cálculo serán menores y el análisis más fácil de realizar.

- Se han eliminado las cubetas, cuerdas y demás elementos del sistema de elevación sustituyéndolos por dos momentos en cada uno de los tambores. Todos estos elementos

serán sustituidos por un momento de la fuerza que provoca el peso del agua cargada por la cubeta sobre el tambor cilíndrico. Asimismo, se han despreciado el peso del asa, de los materiales pequeños y de la misma cuerda porque son valores pequeños, y porque del otro tambor cuelgan los mismos elementos actuando a modo de contrapeso.

- Se ha eliminado la veleta de la estructura superior. Este elemento ofrece una información sobre la dirección del viento, pero no tiene ninguna función estructural y su peso es despreciable.
- Se va a suponer que las artesas están completamente llenas de agua, lo que se va a traducir en dos presiones determinadas en el fondo de cada una de ellas, ya que el análisis de tensiones se va a realizar en el caso más desfavorable.
- Se ha despreciado el peso de las levas frente al resto de tensiones ocasionadas, ya que además no tienen ninguna función estructural, por lo que se eliminan del análisis.

Con lo dicho hasta aquí, cabe concluir que el mecanismo de estudio será el formado por dos grandes conjuntos: de una parte, la estructura superior formada por palas (aspas), sus guías y eje vertical con su tornillo sinfín en el extremo inferior, y de otra, por la estructura inferior formada por el bastidor, los dos tambores cilíndricos con sus coronas metálicas, el carro que facilita el movimiento lateral del eje vertical, y por último el balancín de llenado.

Queda por exponer una última condición que va a cambiar sustancialmente el resultado del análisis: la posición que tenga el eje vertical de la máquina, ya que no es indiferente. No resulta lo mismo que el tornillo sinfín trabaje engranado con las coronas de los tambores o que no lo haga. Por ello se va a realizar el estudio de tensiones teniendo en cuenta dos posiciones extremas: en la primera de ellas, el eje estará engranado con los tambores, y en la segunda, el eje descansará completamente en el carro (Figura 3.15).

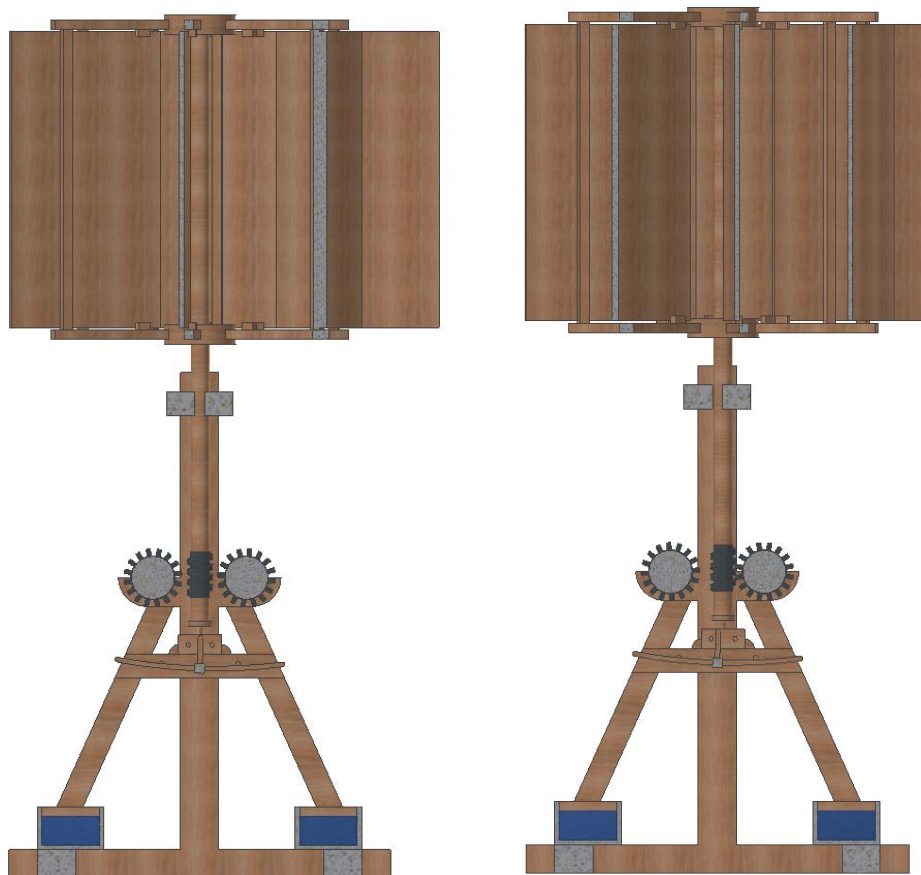


Figura 3.15. Posición centrada (Izda.) y posición engranada (Dcha.).

3.2.3.2. Asignación de materiales

Una vez que se ha preprocesado el modelo asumiendo las simplificaciones indicadas previamente, hay que asignar a cada elemento del ensamblaje un material concreto con unas determinadas propiedades. La escasísima información que se ha obtenido sobre la invención histórica estudiada no permite conocer con exactitud los materiales empleados por el ingeniero canario en su construcción. Aun así, se han asignado materiales sencillos a los que pudo tener acceso Betancourt, y en particular, de la biblioteca de materiales del software utilizado (Autodesk Inventor Professional), se han empleado aquellos que se ajustaban a los requerimientos operativos, es decir, hierro fundido para piezas metálicas y roble para las de madera, que por otro lado es el material principal de la máquina.

Las propiedades térmicas, mecánicas y los límites de resistencia de estos materiales se pueden consultar en el citado mismo software. El hierro fundido tiene un comportamiento isótropo y sus propiedades físicas principales son: módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (7.150 kg/m³) y tensión de rotura (758 MPa). En cambio, la madera de roble tiene unas propiedades más complicadas ya que es un material ortótropo. Se sabe que, si se actúa en la dirección de la veta, las propiedades son mejores, pero no así en las otras dos direcciones. Por tanto, se ha supuesto que la dirección de la veta es la que define la dirección principal de los cuerpos, como es lógico y, por lo tanto, sus propiedades físicas son: módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (760 kg/m³) y tensión de rotura (41 MPa).

3.2.3.3. Condiciones de contorno

Una vez que se tienen aplicados los materiales a todos los componentes del conjunto, el siguiente paso en la preparación de la simulación es imponer condiciones de contorno. Cada uno de los componentes del conjunto puede funcionar de determinada manera atendiendo a su movilidad, lo que afectará al análisis estático del ensamblaje.

En primer lugar, se tienen elementos que tienen una restricción de movimiento completa, como son los componentes fijos. Así pues, en este caso, la base de la estructura principal se considera empotrada o fijada al suelo (Figura 3.16 (Izda.)).

Un segundo tipo de restricción, con un grado más de libertad, son aquellos componentes que no pueden desplazarse longitudinalmente pero sí pueden girar; en Autodesk Inventor Professional, esta restricción se llama de rodadura o de pasador, presentándola un buen número de componentes. Así pues, en primer lugar, existe una restricción entre el eje vertical y la base o carro donde se apoya; en segundo lugar, entre las aspas y las guías y, por último, el de los elementos horizontales (tambores cilíndricos, levas y regulador de llenado) apoyados en el bastidor inferior con los tambores y el mecanismo de llenado (Figura 3.16 (Dcha.)).

Un tercer tipo de restricción es el que presenta un grado de libertad más, deslizante o sin fricción, y es el que se establece entre el carro que soporta el peso del eje principal y el bastidor (Figura 3.16 (Inferior)).

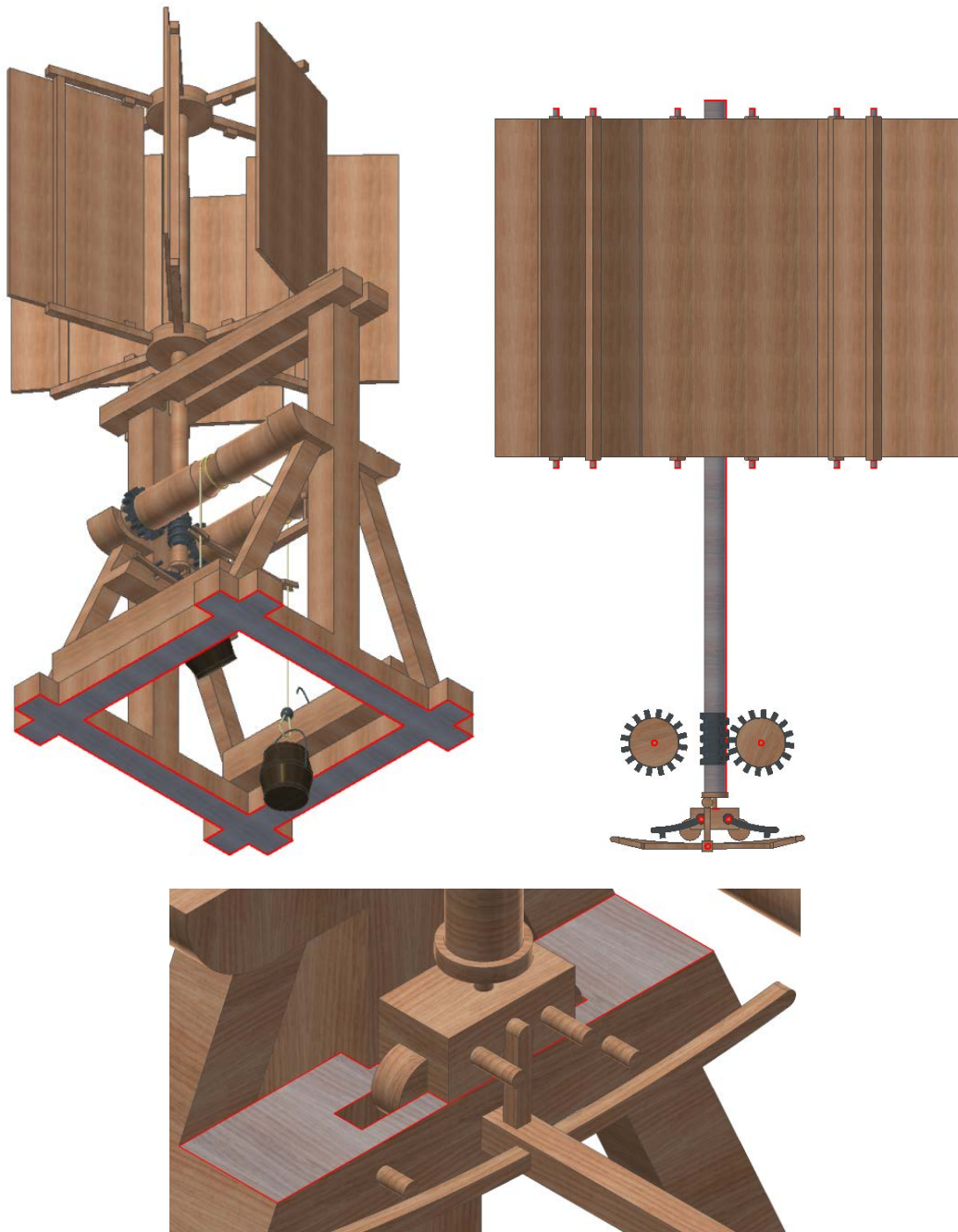


Figura 3.16. Tipos de restricciones: fija (Izda.), rodadura (Dcha.) y sin fricción (Inferior).

Por último, es necesario indicar que las condiciones de contorno no se ven afectadas por las dos posiciones anteriormente citadas, aunque sí que hay que definir los contactos correctamente. Así pues, para que el análisis de tensiones sea correcto hay que activar los contactos entre todas las piezas del ensamblaje; de este modo Autodesk Inventor Professional determina automáticamente las superficies entre las distintas piezas que van a entrar en contacto. No obstante, el software permite definir manualmente algunos contactos en el caso de que por su complicada geometría no sea capaz de identificarlos correctamente (Figura 3.17). Éste es el caso del contacto que existe entre el eje vertical y el taladro practicado en la parte superior del bastidor, y cuya función es mantener la posición vertical del eje. Asimismo, a la hora de estudiar la posición engranada, se debe definir manualmente otro contacto importante, y es el que se establece entre el tornillo sinfín y la corona dentada del tambor. El resto de piezas tienen correctamente definidos sus contactos.

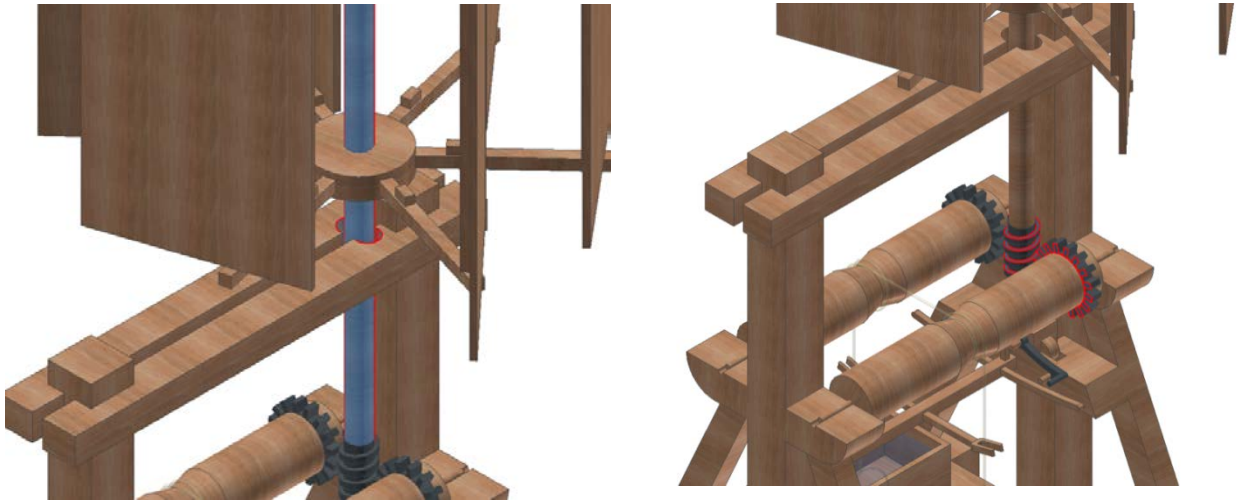


Figura 3.17. Activación de contactos de forma manual.

3.2.3.4. Fuerzas aplicadas

La siguiente etapa en el análisis estático del conjunto, es concretar la acción de las cuatro fuerzas que van a incidir sobre él: la acción del viento sobre las palas, el peso del agua sobre el fondo de las artesas, las fuerzas sobre los tambores producida por el agua elevada por la cubeta y, por último, la acción de la gravedad sobre todo el conjunto (Figura 3.18).

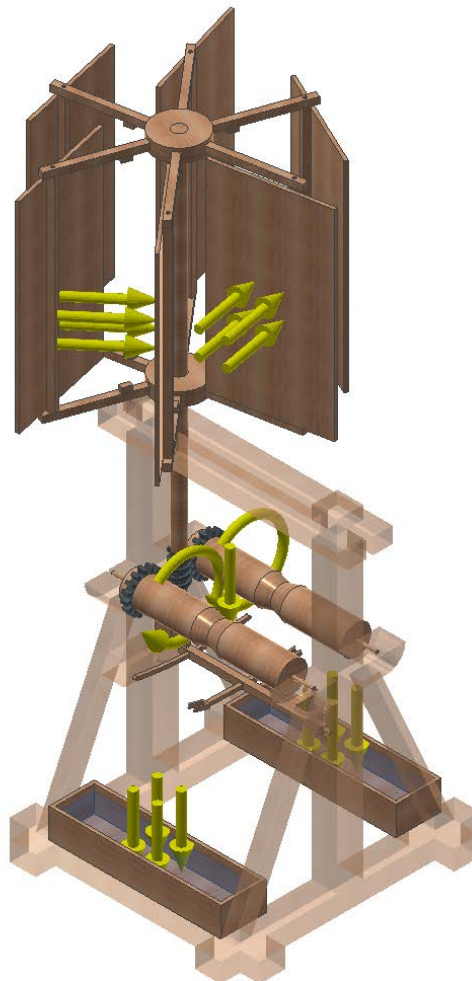


Figura 3.18. Fuerzas que inciden en el modelo 3D.

La presión del viento ejercida sobre las palas es la fuerza principal que acciona la invención, de ahí la necesidad de su correcto cálculo. Sin embargo, la incidencia del viento sobre las palas es un estudio que requeriría un análisis exhaustivo desde la dinámica de los fluidos. Por ello, para el presente estudio se va a simplificar su incidencia, ya que el objetivo de este estudio es estructural, de manera que se va a calcular la incidencia del viento en función de la densidad del aire y la velocidad del viento.

Para obtener la velocidad del viento, se va a suponer que la máquina eólica trabajó en algún momento en algún lugar de Francia donde Betancourt trató de ponerla en funcionamiento. Para ello, acudiendo al Eurocódigo 1 (norma que especifica la incidencia del viento para ser considerada en el cálculo de estructuras y edificaciones) y en su Anexo A, se puede observar que presenta valores por zonas con valores comprendidos entre los 24 y 34 m/s (AENOR, 1998).

Los valores de velocidad de viento son muy altos para unas hipotéticas condiciones de trabajo. En esas condiciones la máquina eólica debería permanecer parada. De todas formas, para el presente análisis se va a tomar el menor de los valores, es decir, el correspondiente a 24 m/s, condición realmente extrema que nunca sería la de trabajo.

La energía cinética (E_c) del viento que incide sobre las palas corresponde con la expresión siguiente:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Siendo m , la masa que transmite una cantidad determinada de energía, y v , la velocidad de dicha cantidad de aire. Además, se sabe que la masa que transmite la energía tiene esta expresión donde δ , es la densidad del aire y V , el volumen de aire que comunica esa energía:

$$m = \delta \cdot V$$

Sustituyendo en la ecuación de la energía cinética se obtiene:

$$E_c = \frac{1}{2}\delta Vv^2$$

Por otro lado, la presión (σ) que ejerce el aire será el cociente entre la energía cinética (E_c) y el volumen de aire que la contiene (V), y sustituyendo las expresiones anteriores, se tendrá que:

$$\sigma = \frac{E_c}{V} = \frac{\delta v^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1.293kg}{m^3} \cdot \frac{24^2m^2}{s^2} = 372,40Pa$$

Así pues, la presión que ejerce el aire por unidad de superficie de la pala es de 372,40 Pa.

Como se puede apreciar en la Figura 3, el aire realmente sólo incide de manera eficaz en dos de las palas. El resto de palas tiene una alineación paralela a la dirección del aire por lo que no presentan oposición. Así pues, se supone que el viento actúa sólo sobre esas dos palas. Las palas, de todas formas, no siempre son perpendiculares a la dirección del viento, y de hecho cuando esto ocurre, la que es perpendicular resta mucho aire a la siguiente. Así pues, se propone un coeficiente de corrección para ambas palas. Se considera un coeficiente de corrección de 0,85 para la primera pala (la de mayor incidencia) y 0,5 para la segunda. Pese a que estos coeficientes son arbitrarios no dejan de ser una aproximación bastante realista. Así pues, se tendrán las siguientes presiones:

$$\sigma_1 = 0,85 \cdot \sigma = 316,53 \text{ Pa}$$

$$\sigma_2 = 0,5 \cdot \sigma = 186,20 \text{ Pa}$$

La segunda de las fuerzas a modelizar es la del peso del agua de las artesas. Su cálculo es mucho más sencillo porque el agua está modelizada, aunque después se haya eliminado del análisis de tensiones para hacer más sencillo su cálculo. El software Autodesk Inventor Professional proporciona las propiedades físicas de cada uno de los componentes modelizados, por lo que se conoce el volumen del agua de cada artesa es de $0,459 \text{ m}^3$, su masa (m) con un valor de $485,22 \text{ kg}$, así como el área (A) del fondo de la artesa de valor $1,53 \text{ m}^2$. Con estos datos se calcula de una manera sencilla la presión sobre el fondo de la artesa. La ecuación de la presión (σ) es:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} = \frac{485,22 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{1,53 \text{ m}^2} = 3.111,12 \text{ Pa}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad. Así pues, en la condición más desfavorable la presión que el agua ejerce sobre el fondo de cada una de las artesas cuando están llenas de agua, es de $3.111,12 \text{ Pa}$, que sería la condición más desfavorable de cara a un análisis estático.

La siguiente fuerza a modelizar es la producida por el agua ascendida por la cubeta. Como se ha explicado anteriormente, el peso del agua ascendida incide directamente en los tambores en los que está enrollada la maroma que asciende y desciende las cubetas. Se ha sustituido este peso por un momento de fuerza aplicado por igual en cada uno de los tambores. Ese momento se calcula a partir del peso que asciende de la cubeta.

Para su cálculo, se conoce que el momento de fuerza es el producto vectorial entre la Fuerza (F) y el radio de giro (r) de del cuerpo sobre el que se aplica la fuerza:

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$$

La fuerza de la que se trata es el peso de la cubeta llena de agua, que tal y como se ha indicado anteriormente, es calculado automáticamente por el software al revisar las características (iProperties) del agua de la cubeta. Se sabe que el volumen de dicha cubeta es de 100 litros , lo que equivale a $979,04 \text{ N}$ de peso, y el radio de $0,225 \text{ m}$. Sustituyendo en la fórmula, se tiene que:

$$|\vec{M}| = 979,04 \text{ N} \cdot 0,225 \text{ m} = 220,28 \text{ Nm}$$

Existe un momento de fuerzas en cada uno de los tambores de $220,28 \text{ Nm}$ que tiene que vencer el tornillo sinfín. Si la fuerza del viento no es capaz de superar este momento la cubeta no subirá el agua. Así pues, se puede suponer que uno de los puntos donde habrá una sollicitación mayor será precisamente aquel donde tocan el tornillo sinfín y la corona dentada del tambor. Hay que precisar que cuando el eje está en una posición centrada, la cubeta está vacía, y por lo tanto, este momento no existe para dicha posición.

Por último, falta por incluir la gravedad en la simulación. Para incluir esta magnitud basta con definirla. Para ello el software permite representar el vector aplicado en el centro de gravedad del mecanismo ($9,81 \text{ m/s}^2$) en sentido negativo del eje Z.

Finalmente, una vez aplicadas todas las fuerzas, la simulación queda preparada a expensas de la discretización del dominio computacional a considerar y posterior cálculo.

3.2.3.5. Discretización o mallado

El último paso antes de la simulación es discretizar todo el ensamblaje a partir de un mallado que debe ajustarse lo mejor posible a la geometría real del modelo. Los pasos que se van a dar a continuación van encaminados, precisamente, a conseguir una malla lo más fidedigna posible a la realidad modelada. Sin embargo, los puntos donde es especialmente importante ser cautos con la generación automática que nos propone el software son dos: en primer lugar, en aquellos lugares en los que la geometría es más compleja, y en segundo, en los puntos o regiones donde se aplican las fuerzas.

Al configurar el cálculo automático de la malla hay que determinar una serie de variables. El software propone automáticamente un tamaño medio para la malla del 10% de la longitud del elemento a discretizar, un tamaño mínimo del elemento del 20% del tamaño medio, un factor de modificación con valor de 1,5, y un ángulo máximo de giro de 60°. Sin embargo, estos factores se pueden modificar para determinar una malla más acorde con la geometría del mecanismo.

En la presente investigación, se han utilizado los valores por defecto de mallado, pero sí ha realizado un mallado especial para los elementos más sensibles, citados anteriormente. Para ello Autodesk Inventor Professional permite realizar un control de malla local seleccionando la superficie sobre la que se quiere hacer un refinamiento del mallado y proponiendo un nuevo tamaño de la malla en mm. Así pues, para las zonas sensibles se ha establecido un tamaño de elemento de 15 mm, consiguiendo de este modo una malla variable pero más adaptada a la geometría de los objetos. El control de malla local se ha utilizado fundamentalmente en el punto de apoyo del eje vertical con el carro, en la inserción de las palas con sus guías, en el punto del contacto del eje vertical con el taladro practicado en el bastidor y en el fondo de las artesas. La Figura 3.19 muestra un ejemplo de cómo varía el mallado respecto al proporcionado en la discretización automática.

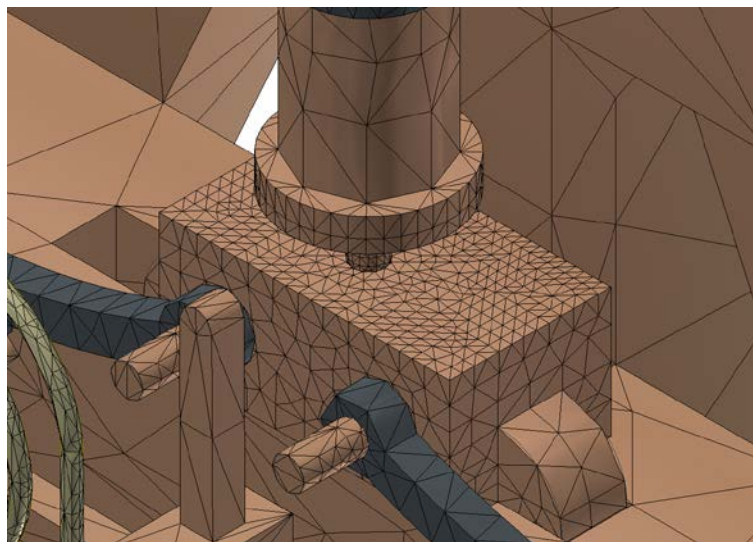


Figura 3.19. Discretización obtenida tras el refinamiento de la malla en el apoyo del eje.

3.2.3.6. Resultados y discusión

El análisis estático realizado por el software proporciona resultados sobre las tensiones de von Mises, los desplazamientos, las deformaciones y el coeficiente de seguridad.

Como ya se comentó anteriormente, hay que diferenciar el estudio de las tensiones teniendo en cuenta las dos posiciones (centrada y engranada), ya que ambas posiciones van a arrojar resultados diferentes. El análisis de la tensión de von Mises (Figura 3.20) revela que el

mecanismo está sometido por lo general a tensiones bajas, aunque hay algunos puntos singulares donde se dan puntualmente máximos que deben ser valorados.

Cuando el mecanismo está centrado hay tres puntos con valores altos de tensión: en las guías de las palas (en las inserciones con las palas y el eje), en el punto donde tocan el eje vertical y el taladro del bastidor y, por último, en el punto de apoyo del eje sobre el carro. La tensión con valor más alto (7,84 MPa) está localizada en el punto de contacto entre el eje vertical y la guía superior.

Por otro lado, cuando el mecanismo está engranado existe un punto singular, además de los citados anteriormente, y es precisamente, el punto de contacto entre el tornillo sinfín y la corona dentada del tambor cilíndrico, como cabía esperar. La tensión con valor más alto (28,74 MPa), en este caso cambia, y está localizada precisamente, en este último contacto entre el tornillo sinfín y la corona dentada (Figura 3.21).

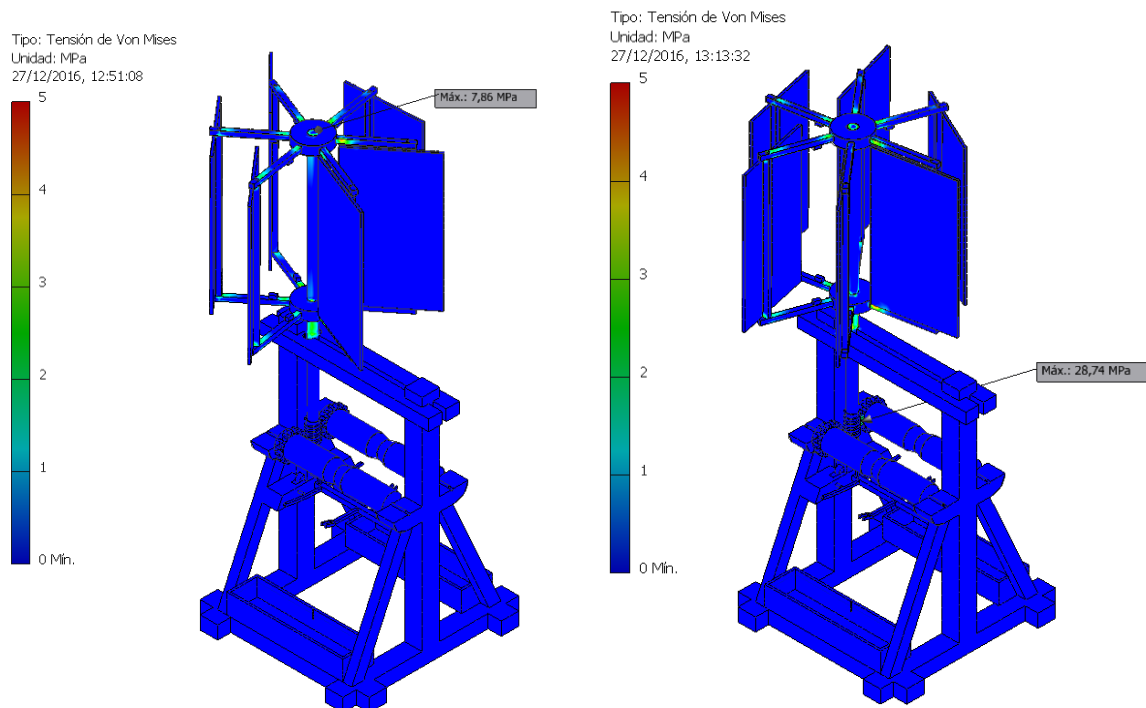


Figura 3.20. Tensiones de von Mises en la posición centrada (Izda.) y en la posición engranada (Dcha.).

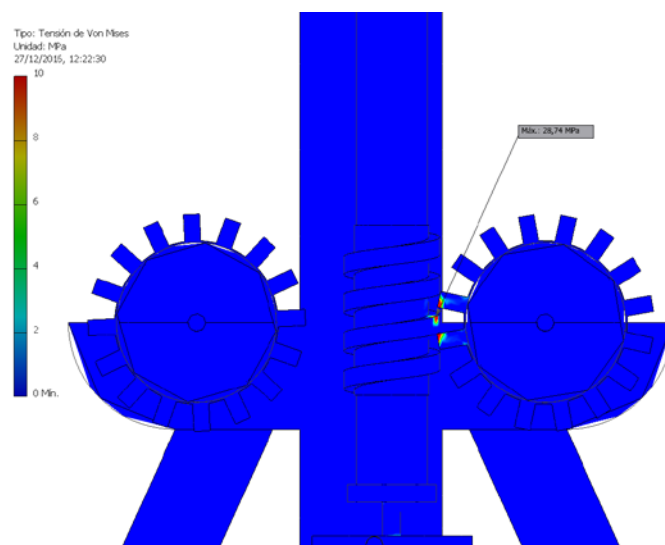


Figura 3.21. Detalle de la tensión de von Mises entre el tornillo sinfín y la corona dentada.

Por otro lado, se conoce que la tensión de rotura para compresión en una dirección paralela a la veta de la madera de roble es de 41 MPa, y la del hierro fundido 758 MPa. Los resultados obtenidos en el análisis de tensiones de von Mises, muestran que ningún punto del mecanismo supera la tensión de rotura; concretamente se conoce que el punto del mecanismo que tiene un mayor valor de 28,74 MPa es de hierro fundido, por lo que está lejos de dicho límite. Para que este resultado se observe gráficamente mejor, se puede cambiar la escala de colores poniendo como límite superior la tensión de rotura de la madera o del hierro fundido; sin embargo, en las imágenes mostradas se ha elegido un límite superior mucho más bajo (5 ó 10 MPa) con el fin de resaltar mejor las zonas con mayores esfuerzos.

Otra forma de conocer el estado de los materiales es calcular el coeficiente de seguridad que tiene en cuenta cada material independientemente y su deformación. El coeficiente de seguridad se obtiene como la relación entre el límite de elasticidad del material y la tensión de von Mises en cada punto. Si el coeficiente de seguridad es inferior a 1 significa que, en ese punto, la seguridad del mecanismo está comprometida, al alcanzar el límite de elasticidad. Un resultado aceptable sería un coeficiente de seguridad entre 2 y 4. En el mecanismo estudiado, el punto con un coeficiente de seguridad menor (5,5) es el punto de inserción del eje vertical con la guía de las palas. Por lo tanto, todo el mecanismo trabaja por encima del límite elástico del material, pero a la vez está lejos de trabajar en el rango óptimo. Se podría decir que el mecanismo, como era habitual en la época, estaba sobredimensionado y que se podría haber optimizado de cara a un mejor aprovechamiento de las propiedades de los materiales empleados.

Asimismo, las deformaciones equivalentes son distintas dependiendo de si el eje está engranado o no lo está. Cuando está en una posición centrada (sin engranar), la deformación mayor se produce en el extremo superior del eje vertical, pero cuando está engranado con la corona dentada, la deformación mayor se da en el punto de contacto del eje con el bastidor. En ambos casos, la deformación resulta muy pequeña.

Finalmente, se puede comprobar que los mayores desplazamientos se producen en el extremo de las palas sobre las que incide directamente el viento con independencia de la posición en la que se encuentre el eje. La posición del eje sólo va a influir en la magnitud del desplazamiento. En cualquier caso, el desplazamiento máximo es de 26,81 mm, un desplazamiento asumible para un elemento flexible como la madera (Figura 3.22).

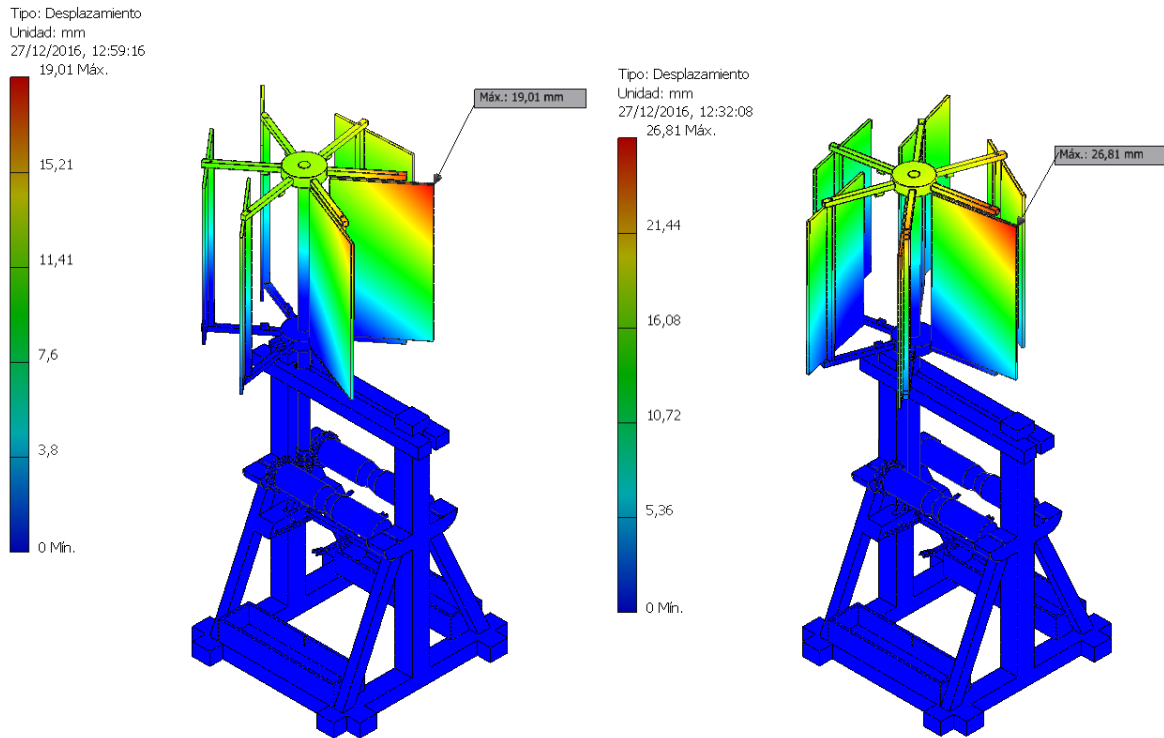


Figura 3.22. Distribución desplazamientos en las posiciones centrada (Izda.) y engranada (Dcha.).

3.2.3.7. Conclusiones

El alto número de componentes, así como la complejidad de los mismos, ha justificado la simplificación del conjunto a analizar. Dicha simplificación, que no afecta a los resultados del análisis estático realizado, permite que el volumen computacional sea menor, y por tanto, reduce los altos requerimientos computacionales. Sin estas simplificaciones, los resultados obtenidos no hubieran mejorado y el tiempo de simulación hubiera sido mucho mayor. Sin embargo, la simulación de cuerdas y cables por parte de dicho software, es una asignatura pendiente.

Las mayores tensiones que soporta el mecanismo tienen lugar cuando éste está engranado con la corona dentada (ascendiendo agua), concretamente el punto de contacto entre el tornillo sinfín y dicha corona. Sin embargo, los máximos desplazamientos y las mayores deformaciones tienen lugar en la parte superior del mecanismo, es decir, en las palas impulsoras, como cabía esperar. En cualquier caso, de acuerdo con los resultados que arroja el estudio de los coeficientes de seguridad, el mecanismo está claramente sobredimensionado, lejos de aprovechar correctamente las características de los materiales empleados. Asimismo, este modo de proceder era el común en los ingenios de la época ya que no existían todavía ensayos con materiales.

Así pues, dicha invención de la que no se conoce nada sobre su ejecución material, fue un ingenio perfectamente proyectado: sobredimensionado y por tanto, diseñado para trabajar sin problemas estructurales ni mecánicos, y con unos requerimientos, tanto de funcionamiento (necesidades eólicas) como de mantenimiento, muy bajos. Por lo tanto, a partir de la presente investigación, se puede confirmar que su construcción pudo ejecutarse perfectamente.

3.2.4. Impresión 3D

Para la impresión 3D del modelo, como ya se comentó en el capítulo anterior, ha sido necesario transformar los ficheros de cada una de las piezas del ensamblaje en ficheros STL. En este caso, no ha sido necesario transformar una a una, todas y cada una de las piezas, ya que algunas de ellas actúan solidariamente y se pueden exportar como ensamblaje. Este tipo de acción simplifica la impresión y su posterior montaje, pero no siempre se puede atender a este criterio ya que la geometría de algunas piezas, o de algunos posibles ensamblajes, puede ser complicada al presentar huecos. Ya se comentó que, para que la impresora 3D pueda imprimir todas las paredes de un objeto, las oquedades comprendidas entre ellas se rellenan de plástico soporte que después debe ser retirado. La retirada de este plástico no siempre es sencilla, y puede afectar a la estructura si ésta es débil. Una vez exportadas las piezas se ha procedido a definir cuál es su mejor orientación en la impresora y la calidad del plástico a utilizar, dependiendo de lo delicado de dicha pieza y el nivel de precisión que se ha querido proporcionar al mecanismo.

Al mismo tiempo, ha sido necesario escalar la invención. Esta operación es determinante para el éxito de la impresión. Por un lado, hay ciertos límites que conviene tener en cuenta. La pieza que ha marcado el dimensionado de la estructura ha sido el soporte. Así pues, se ha estimado que la altura de dicho soporte no podía ser superior a los 18 cm, ya que, aunque la impresora era capaz de proporcionar mayores dimensiones, las piezas más pequeñas ya tenían un tamaño suficientemente grande para ser bien observadas, y no era necesario un dimensionado mayor. La escala utilizada ha sido 1:33, y no ha habido que hacer ninguna adaptación de escala a ningún elemento.

Los elementos que se han considerado más delicados como el eje vertical, los soportes de las aspas, tambores, engranajes, el carro, las levas y el mecanismo que controla el movimiento de los cangilones, se han impreso con mayor detalle utilizando para su impresión la resina fotosintética aportada por la impresora Stratasys Objet 30. El resto de elementos se han impreso en filamento PLA utilizando la impresora Airwolf, y sólo la cuerda ha sido impresa en otro material, concretamente PLA flexible, también impresa en la impresora Airwolf.

Respecto a las dificultades encontradas, resulta evidente que, por el tamaño de muchos de los elementos, es necesario tratarlos con mucho cuidado y que la retirada de soporte debe ser muy cuidadosa, sobre todo en los elementos impresos en PLA, ya que el soporte está hecho del mismo material, y a veces su retirada puede comprometer la estructura. El elemento más complicado de imprimir, debido a ese trabajo posterior de limpieza de soporte, ha sido el soporte inferior de la estructura. Sin embargo, gracias a sus grandes dimensiones, el acceso al mismo ha sido sencillo y ha quedado bien definido.

Asimismo, tras el ensamblaje (Figuras 3.23 y 3.24), se han observado una serie de complicaciones que obedecen a un problema estructural. En los planos de Betancourt se observa que es necesaria una holgura transversal del soporte horizontal para que el eje vertical pueda moverse transversalmente, y se ha comprobado que esta holgura hace que el eje trabaje algo inclinado respecto a la vertical, lo que provocaría consecuencias en la invención a nivel estructural que ya señalaba el estudio de tensiones. Por un lado, el extremo inferior está expuesto a un movimiento de cabeceo que no es recomendable ya que el eje está diseñado y dimensionado para trabajar verticalmente y no con cierta inclinación. En segundo lugar, ese cabeceo afecta al movimiento del carro que no completa el recorrido deseado y del que depende que las levas enganchen en la posición correcta haciendo engranar el tornillo sinfín y el tambor. Por último, el rozamiento del eje con el cuello del soporte no sería horizontal sino inclinado y

esto puede dar lugar a un desgaste superficial que a la larga hace que el ángulo de inclinación del eje y la holgura sean mayores.

No es objeto de este trabajo aportar una solución a este mínimo inconveniente, pero con una simple argolla metálica que obligara a mantener vertical el eje del mecanismo rotor, dicho problema se solucionaría.

Cabe destacar que la impresión y ensamblaje de la impresión 3D de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos facilita enormemente comprender las dificultades del montaje final de dicha invención. El bastidor inferior de la máquina es el primer elemento sobre el que debe montarse el resto de piezas, pero las dos vigas superiores del bastidor deben colocarse sólo tras disponer el eje vertical en su lugar. Cuanto más se ajusten estas dos vigas con el eje vertical menores serán los problemas derivados del exceso de holgura anteriormente comentado. Por otro lado, los tambores y el mecanismo ascensor también deben ser colocados en un primer momento, ya que al ser elementos plásticos permiten una flexibilidad que la madera no admite, por lo que también deben colocarse en sus respectivas posiciones durante el montaje del bastidor.

El resto de elementos podrían ser montados aparte, y posteriormente ensamblados en el conjunto, como las aspas con sus soportes, el carro, las artesas, etc., como han hecho los autores. La única observación que podría hacerse es la de ensamblar el mecanismo rotor completamente y después colocarlo en el bastidor. Esta solución podría presentar dificultades ya que, si se coloca primero el eje rotor y posteriormente se ensamblan los soportes con las aspas, habría que trabajar a una altura considerable para poder insertar los soportes de las aspas por la zona superior del eje.

Así pues, es responsabilidad del encargado del montaje, sopesar si es menos problemático trabajar a tanta altura o ensamblar el resto del bastidor con la incomodidad de trabajar con el mecanismo rotor montado.

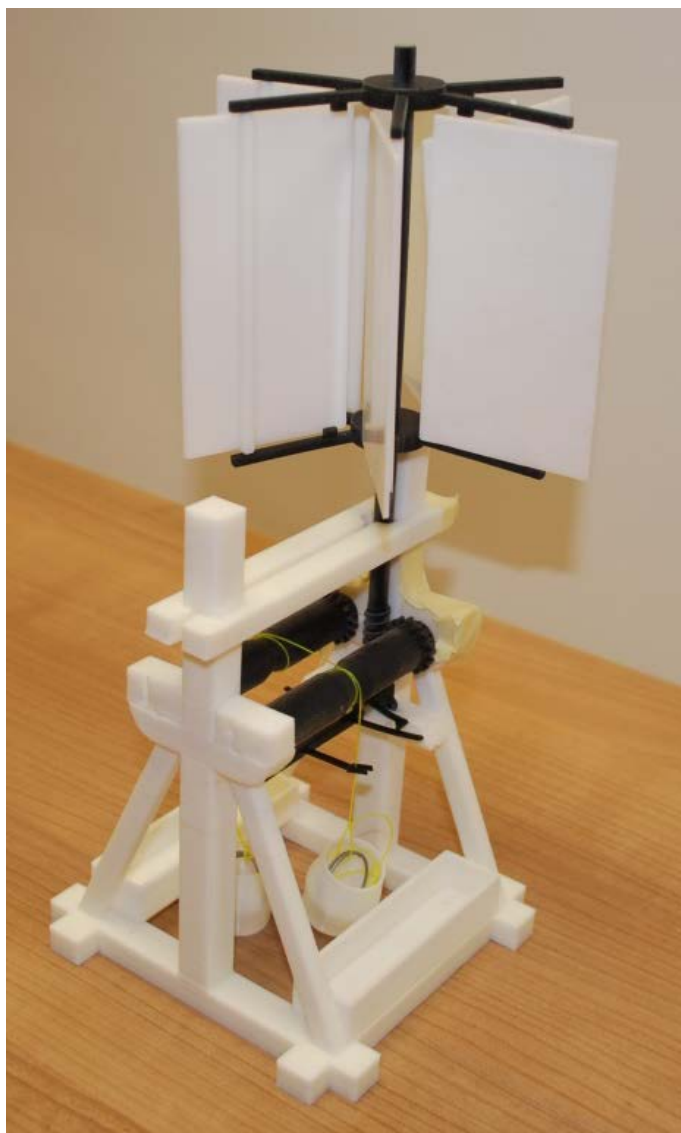


Figura 3.23. Vista general de la impresión 3D.

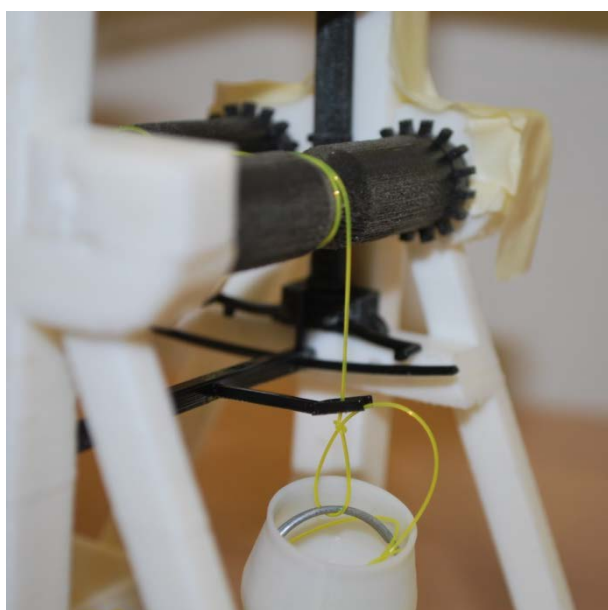


Figura 3.24. Detalle del mecanismo de elevación.

3.3. Máquina para cortar cañas y otras plantas en canales y ríos navegables

3.3.1. Introducción

Unos de los objetos sobre los que Agustín de Betancourt dedicó mayor atención fueron los canales hidráulicos para el transporte de mercancías. Se conoce que el ingeniero español trabajó en la evaluación, mantenimiento y ampliación de los canales peninsulares: el Canal Imperial de Aragón (Sáenz Ridruejo, 1978) y del Canal de Castilla. Posteriormente, en 1784 marchó a Francia a L'École des Ponts et Chaussées para realizar estudios de hidráulica y mecánica. La experiencia francesa le puso en contacto tanto con la realidad del magnífico canal de Midi, imponente obra de ingeniería que conectaba la cuenca atlántica con la mediterránea a través de 241 km, como con el proyecto francés dirigido por su amigo Louis Becquey para la creación de toda una red de canales. En 1788 Betancourt realizó una primera estancia en Inglaterra donde contempló el plan de canales desarrollado en las Islas, muy distinto al llevado a cabo en el continente. En su opinión, los canales ingleses, al ser menos profundos eran más eficaces en el transporte que los franceses y necesitaban menos cantidad de agua para funcionar.

Con toda esta experiencia empezó a desarrollar todo un sistema de navegación por canales que muchos años después cristalizaría en su memoria *"Sur un nouveau système de navigation intérieure"* presentado en París en 1807 (Prony, 1807). Todo el sistema estaba desarrollado hasta el último detalle, y fue defendido ante la Academia Francesa por Betancourt y por el Director de L'École des Ponts et Chaussées, Monsieur Prony.

En este marco es donde se encuadra el invento de la máquina para cortar las cañas y otras plantas acuáticas en los canales y ríos navegables. En 1793 regresó a Inglaterra para una estancia de tres años, y durante este tiempo se dedicó a recopilar inventos para el Real Gabinete de Máquinas del Palacio del Buen Retiro del que era Director. Esta estancia, más sosegada, le permitió descubrir algunos de los inconvenientes de la red británica de canales, en concreto, el crecimiento de plantas acuáticas debido a su escasa profundidad. Para paliar dicho inconveniente, Reino Unido gastaba una cantidad de recursos considerables en su limpieza. Agustín de Betancourt ideó una máquina sobre una embarcación para facilitar las labores de limpieza de los canales. Dicha máquina fue presentada a la Royal Society of Arts en 1795 y ganó un premio de 40 guineas. El invento apareció publicado en el anuario de dicha Sociedad *"Transactions of the Society Instituted at London for the Encouragement of Arts, Manufactures, and Commerce"* (Betancourt y Molina, 1796a).

Todavía en 1796 el propio Betancourt envió a España una lámina a color similar a la expuesta a la Royal Society of Arts y dedicada al príncipe de la Paz, Manuel Godoy. Sólo unos años después (1800), se tradujo al francés con idea de ir acometiendo una gran memoria sobre un nuevo modo de diseñar los canales de navegación (Betancourt y Molina, 1800). Posteriormente, en 1805, se escribió un informe en el que se comparaban las máquinas inventadas por Betancourt y Lesage de cara a su uso en el canal de Midi, presentando las ventajas e inconvenientes de los respectivos inventos (Betancourt y Molina; Lesage, 1805). Todo el material del que se habla está recopilado de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, y está disponible en el sitio web del proyecto digital Betancourt.

3.3.2. Diseño Asistido por Ordenador

Para modelizar la invención se ha trabajado con todo el material, pero el documento base ha sido precisamente la lámina coloreada enviada al Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro en 1796. En la parte superior aparece una proyección diédrica (alzado) de la máquina funcionando. En la parte inferior aparecen un detalle del alzado, el perfil izquierdo y la planta superior. Además, se observa en detalle una parte del instrumental para cortar las plantas, aunque la lámina no presenta escala a la que hacer referencia.

La memoria descriptiva ha servido para entender el funcionamiento de la máquina y comprender mejor algunos detalles constructivos que no se deducen de la lámina. Tras todo este estudio ha sido inevitable adoptar algunas hipótesis geométricas y dimensionales para que el conjunto funcionara perfectamente. Para obtener el modelo 3D se ha utilizado como metodología la restitución digital de dicho modelo utilizando como herramienta Autodesk Inventor Professional 2016, software paramétrico de diseño asistido por ordenador desarrollado por Autodesk.

Seguidamente, se muestra en detalle el proceso seguido en el modelado tridimensional y su documentación geométrica, explicando las restricciones aplicadas y las hipótesis adoptadas para que el diseño de la invención histórica fuera coherente.

El proceso de modelado ha sido complejo por la falta de información detallada. Todas las partes de la máquina están dibujadas en la lámina, pero la ausencia de escala y de espacio hacen que el detalle sea insuficiente para obtener un modelo CAD 3D fidedigno. Por ello, se ha adoptado una escala gráfica para que las dimensiones de los elementos fueran coherentes. El fin de las láminas, no era dar datos precisos sobre el proceso de fabricación o montaje, pues no existían los protocolos de normalización, sino que se trata de diseños conceptuales, cuya finalidad era presentar una solución técnica para resolver un problema, de ahí sus deficiencias en la información e incluso la incongruencia en alguna de sus dimensiones.

Debido a esto, ha sido necesario realizar algunas hipótesis dimensionales y geométricas, así como restricciones de movimiento (grados de libertad) entre los diferentes elementos del conjunto. En el modelo, no se ha hecho uso de ningún material estandarizado, ya que en la época todas las piezas metálicas eran de fabricación artesanal. Por el mismo motivo, tampoco ha tenido sentido el cálculo de tolerancias y juegos entre las piezas acopladas.

En la traducción al francés de 1800 aparece una escala en pies en una lámina con una vista de perfil. Dicha lámina corresponde al invento de Betancourt, pero no su autoría. De todas formas, la escala escogida es compatible con la de dicha lámina pese a ser algo rudimentaria. La Figura 3.25 muestra una perspectiva isométrica del modelo 3D obtenido con técnicas CAD, de la máquina para cortar cañas y otras plantas acuáticas en los canales y ríos navegables.



Figure 3.25. Perspectiva isométrica del modelo en 3D.

Al observar el ingenio, se puede apreciar dos partes bien diferenciadas: por un lado, una barcaza clásica para el transporte en los canales, y por otro, el mecanismo que propiamente se dedica al corte, instalado en la parte trasera de la misma.

Betancourt diseñó un sistema de corte versátil, es decir, el cabezal de corte, como se verá a continuación, es intercambiable haciendo unas pequeñas adaptaciones al mecanismo. Dependiendo de la cantidad y dureza de las cañas y plantas acuáticas será conveniente el uso de un determinado cabezal. La Figura 3.26 muestra el plano de conjunto indicando los distintos elementos si tiene un cabezal u otro, y la Figura 3.27 muestra la perspectiva estallada, para que se distingan mejor los elementos que componen el ingenio, facilitando la comprensión de la dirección y orden del ensamblaje de los elementos.

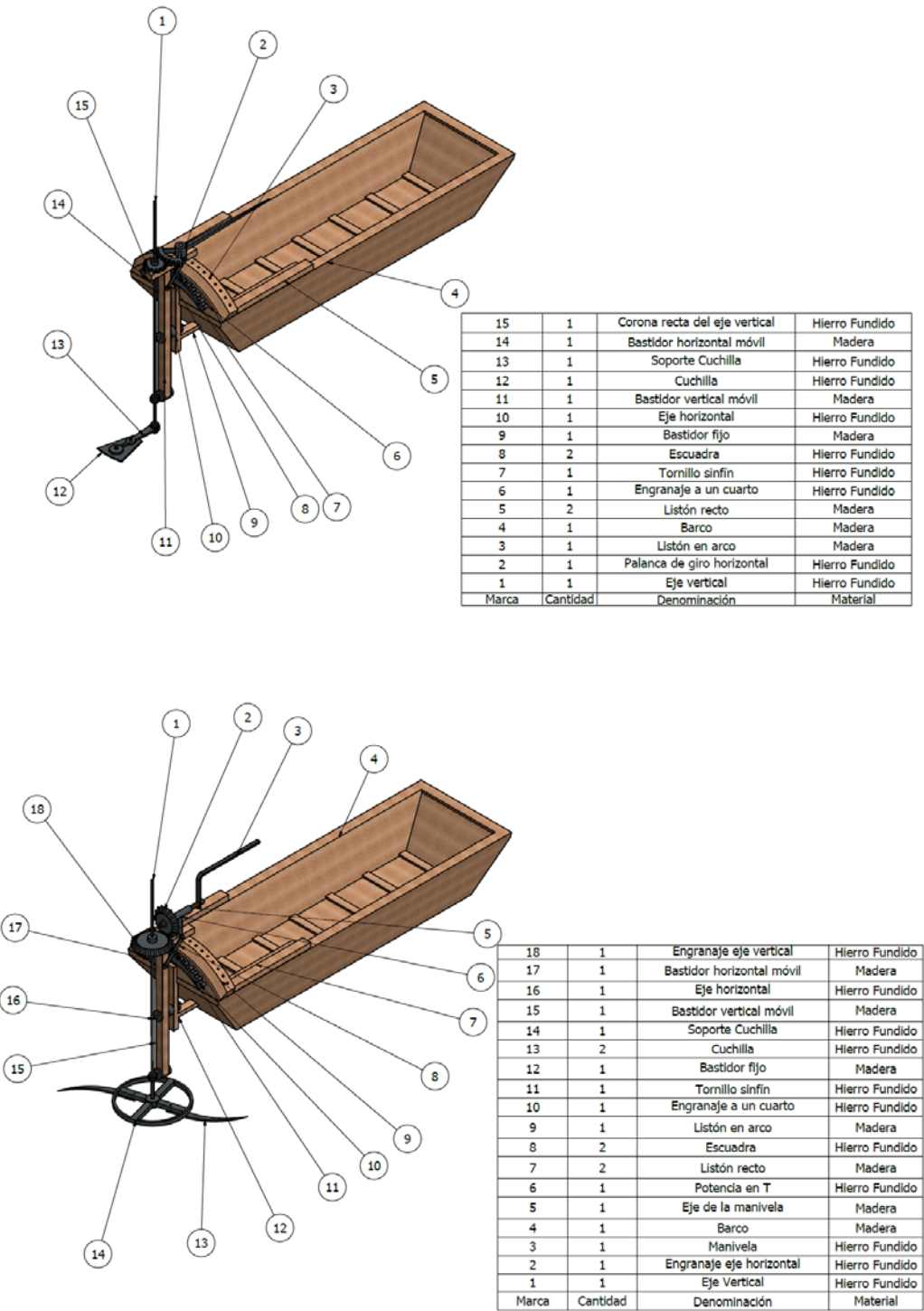


Figure 3.26. Plano de conjunto del modelo 3D: cuchilla simple (arriba) y cuchilla doble (abajo).

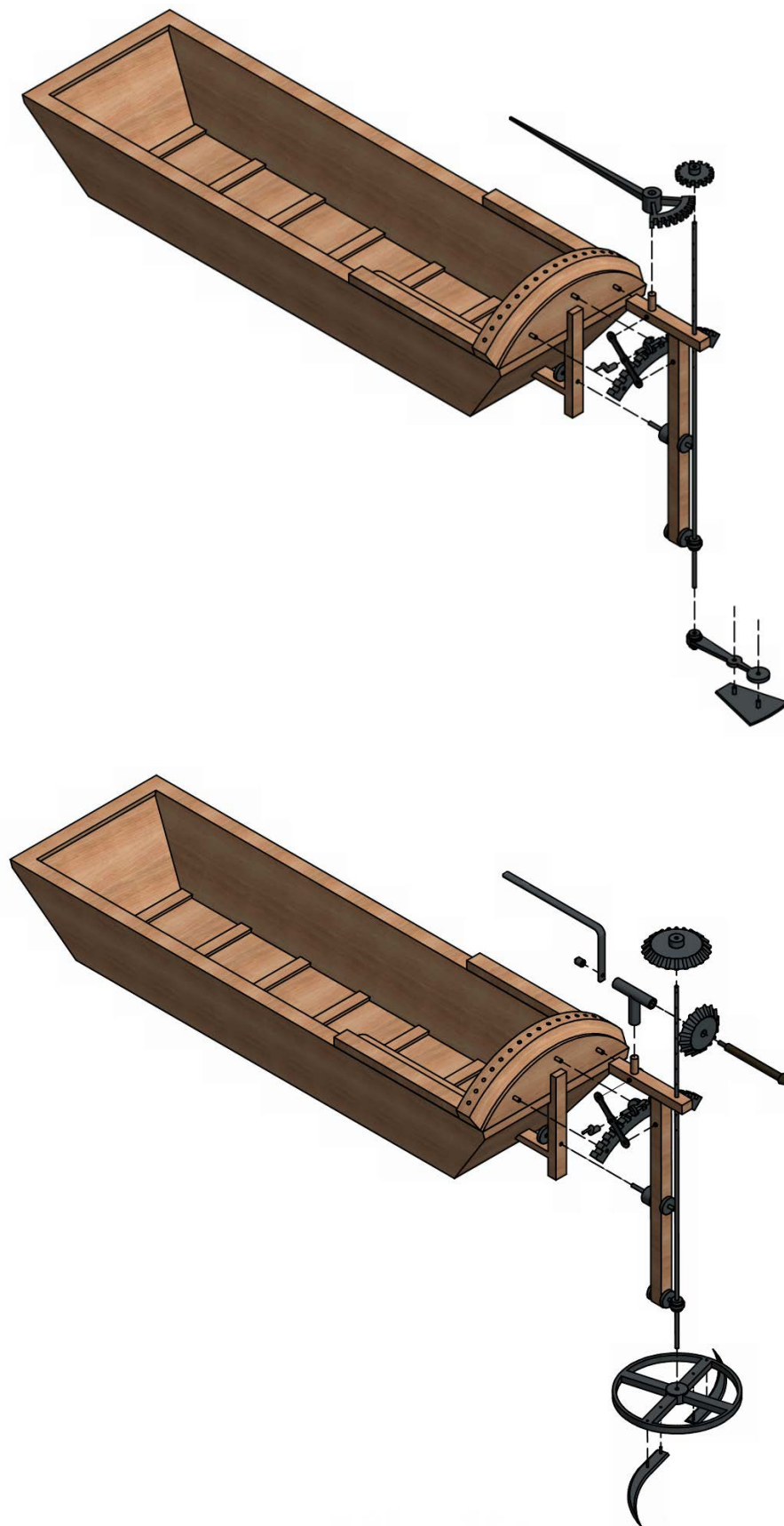


Figure 3.27. Perspectiva estallada del modelo 3D: cuchilla simple (arriba) y cuchilla doble (abajo).

3.3.2.1. Funcionamiento

Como se puede observar en la Figura 3.26 (arriba), el mecanismo cortador está instalado en la parte trasera de la barca (4) y prácticamente es el mismo con independencia del cabezal de corte que se use. La diferencia fundamental en el mecanismo de ambos es que la cuchilla doble es un elemento rotatorio y la simple sólo gira 180°, por lo que, el mecanismo trasero, debe ser el apropiado para facilitar el movimiento de cada cabezal.

Cuando el cabezal es simple (12), la cuchilla va fijada por un soporte perpendicular al eje vertical (13), estando aquél unido al eje vertical (1) solidariamente. En el extremo superior del eje existe un engranaje recto horizontal (15) por el que se comunica el movimiento procedente de una palanca horizontal (2) de gran tamaño que manipula el operador del barco.

Cuando el cabezal es doble (Figura 3.26 abajo), el mecanismo es algo más complejo ya que la finalidad de éste es que gire permanentemente, y eso se va a conseguir a través de un mecanismo de manivela. Las dos cuchillas (13) van fijadas por un soporte en forma de volante (14), estando unidas a través del soporte a un eje vertical (1) de forma solidaria. En el extremo superior de dicho eje existe un engranaje troncocónico (18) a través del cual se facilita el movimiento al eje vertical, y por lo tanto, a las cuchillas.

Las cuchillas tienen un movimiento giratorio respecto al eje vertical funcionando a modo de aspas. Para accionar el movimiento giratorio sobre el bastidor vertical, hay un bastidor horizontal móvil (17), y sobre dicho bastidor, existe una estructura en forma de T (6) que soporta el eje de una manivela (5). La manivela (3) está solidariamente unida a otro engranaje troncocónico horizontal (2) que engrana con el engranaje troncocónico del eje vertical.

El eje vertical está unido a un soporte vertical móvil (11 arriba y 15 abajo) por dos abrazaderas que le permiten girar, pero que impiden el resto de movimientos. Este soporte vertical, no es un eje fijo, sino que gira en torno a un eje horizontal (10 arriba y 16 abajo). Este grado de libertad permite a la cuchilla (o cuchillas) presentar cierta inclinación para ser usadas en las márgenes del canal, en forma de talud. La parte trasera de la barca tiene adosado un engranaje de un cuarto de circunferencia (6 arriba y 10 abajo). Sobre este engranaje se desliza un tornillo sinfín (7 arriba y 11 abajo) que puede desplazarse tangencialmente a derecha e izquierda. El tornillo está unido mediante dos escuadras (8) al bastidor vertical móvil con el fin de cambiar su posición, girando los grados necesarios para adaptarlo al talud del canal, y se acciona mediante una pequeña manivela desde la barca.

Respecto al funcionamiento hay varias cosas que decir. En primer lugar, el operador que se sitúa sobre la barca debe establecer la profundidad a la que quiere que corten las cuchillas. Para ello, el eje vertical dispone de una serie de orificios dispuestos por toda su longitud, para fijar el engranaje troncocónico vertical a la altura conveniente. Seguidamente, y usando la pequeña manivela del tornillo sinfín, se mueve todo el mecanismo a derecha o izquierda en función de la inclinación del terreno. Para fijar su posición, hay una serie de agujeros dispuestos en la superficie del arco de madera, de modo que, introduciendo un pequeño perno, queda fijo. Una vez realizadas estas operaciones, la barca comienza a moverse por el canal tanto a favor como en contra de la corriente. La máquina de Betancourt está diseñada para trabajar linealmente a lo largo del canal haciendo un corte homogéneo de cañas y plantas acuáticas, siendo la labor del operador de la barca, girar paulatinamente la manivela para transmitir el movimiento a las cuchillas.

Existe una obra manuscrita en francés fechada en 1805 que se dedica a comparar las diferencias entre las máquinas para cortar cañas y plantas acuáticas de Betancourt y la empleada por Pièrre-Charles Lesage, de cara a su empleo en el canal du Midi, por lo que se supone que, la invención de Betancourt, llegó a ponerse en práctica (Betancourt y Molina y Lesage, 1805). La originalidad

de la invención de Betancourt radica en que, por un lado, el mecanismo es mucho más simple, y por otro, se puede adaptar a distintos calados y a distintas inclinaciones de talud. Por ello, su operatividad y manejabilidad, son muy grandes. De cara al estudio de la invención y para su completo análisis estático, deberán ser consideradas las dos posiciones extremas que puede adoptar el mecanismo, ya sea con el eje centrado (como estaría si cortara un canal de fondo plano), o ya sea con el eje inclinado (como si cortara las plantas que aparecen en los taludes del canal). Estas dos posiciones, centrada e inclinada aparecen en la Figura 3.28.

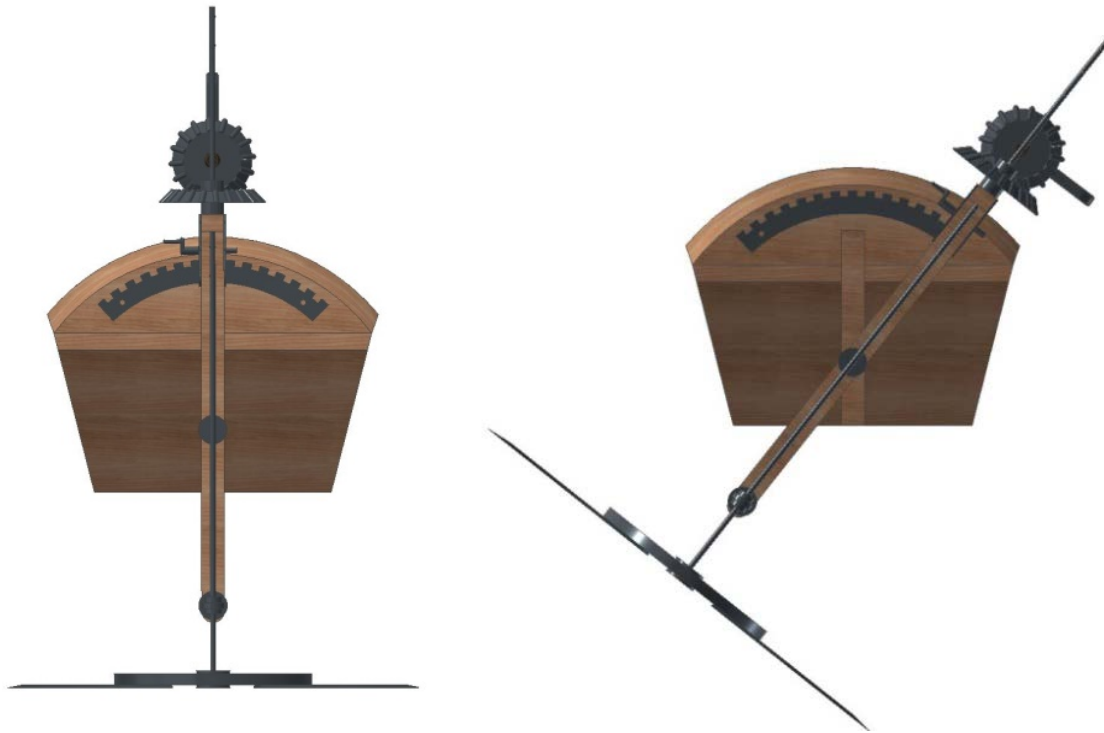


Figura 3.28. Posiciones extremas de la máquina cortadora.

3.3.2.2. Modelado de la embarcación

El mecanismo para cortar plantas acuáticas está montado sobre la parte trasera de una barcaza para navegar en canales, siendo reducidas sus dimensiones: 5,43 m de eslora y 1,68 m de manga. Estaba ideada para soportar poco peso, por lo que tiene un casco plano sin quilla. Su sección es trapezoidal lo que le confiere una serie de características muy especiales. Es una barca poco maniobrable ya que se ideó para ser arrastrada por animales desde la orilla con una o dos maromas. La barca está ideada para presentar la menor resistencia al agua y el menor calado posible de modo que pueda emplearse lo más cerca posible de los bordes del canal.

El espejo de popa está rematado por un segmento circular que eleva la parte trasera respecto a la delantera, alojándose en esta zona, el mecanismo cortador. Para ello, ha habido que modificar ciertas partes para que sirvan de soporte al mismo. En primer lugar, bajo el espejo de popa, hay un bastidor de madera fijo en forma de L que tiene función estructural. Por otro lado, en el mismo espejo de popa, asoman tres pernos de madera sobre los que se colocará el engranaje a un cuarto metálico. Por último, como remate al segmento circular, hay un listón en forma de arco taladrado cada 10 cm cuya función es fijar el mecanismo en una posición concreta respecto al eje vertical (Figura 3.29).



Figura 3.29. Vista de detalle del espejo de popa.

Para que el bastidor de madera en forma de L tenga una resistencia mayor, se une a la barca a través de un agujero practicado en la zona inferior de la popa. Esta unión solidaria confiere estabilidad y resistencia al bastidor. Asimismo, el bastidor en su parte vertical, tiene un agujero pasante para poder acoplar un eje horizontal sobre el que va a pivotar la maquinaria (Figura 3.30).



Figura 3.30. Perspectiva axonométrica de la sección longitudinal de la barcaza.

Por último, hay que señalar que se han modelizado de manera independiente la barca y el bastidor en forma de L. Esto es así por dos motivos: por un lado, son elementos independientes uno respecto al otro, aunque estén fijos, pero a la hora de realizar un análisis de tensiones de von Mises, las piezas podrían tener comportamientos distintos por lo que modelizarlos en una sola pieza podría afectar a estos resultados.

3.3.2.3. Modelado del eje vertical pivotante

El eje vertical del mecanismo es común para los dos tipos de sistemas de corte que propone Agustín de Betancourt (Figura 3.31). El eje pivotante consta de una viga principal (vertical) dispuesta paralelamente al bastidor en L de la barca, y unido a éste mediante un eje horizontal metálico que le permite girar. En la parte superior de la viga hay otra más corta, dispuesta perpendicularmente, y cuya misión es sostener el mecanismo que mueve las cuchillas. Entre la viga horizontal y vertical, hay dos escuadras metálicas, que tienen un doble cometido; reforzar estructuralmente el eje pivotante y sostener un tornillo sinfín. Las escuadras metálicas están

unidas solidariamente a ambos ejes por dos taladros practicados en sus extremos, y que se acoplan solidariamente a los ejes gracias a unos pernos perfectamente situados. Además, las escuadras tienen entre sí colocado un tornillo sinfín que las atraviesa. Dicho tornillo tiene libertad para girar libremente sobre el taladro que tienen ambas escuadras en su ecuador gracias a una pequeña manivela que hay en uno de sus extremos.

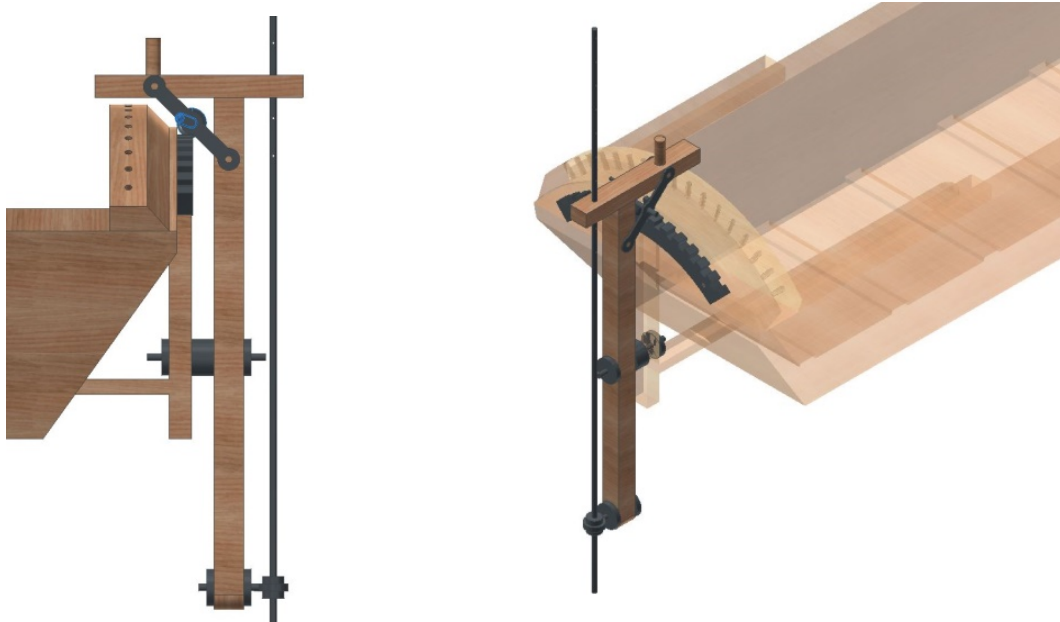


Figura 3.31. Detalle del eje vertical pivotante: vista lateral (Izda.) y perspectiva axonométrica (Dcha.).

El tornillo sinfín tiene una finalidad concreta que hace de su diseño una tarea compleja. La finalidad del tornillo sinfín es engranar con el engranaje recto a un cuarto que está situado en el espejo de popa de la barca (Figura 3.32). Esta es la solución que Betancourt adopta para hacer que el eje vertical tenga una inclinación determinada. Para que esto ocurra el tornillo sinfín, que no es otra cosa que un tornillo de Arquímedes (helicoidal), tiene que ser tangente siempre al engranaje a un cuarto. El radio de curvatura del engranaje tiene que estar centrado en el mismo punto donde pivota el eje vertical, pues de lo contrario, el tornillo sinfín dejaría de ser tangente al engranaje e impediría su movimiento. El paso del engranaje también debe estar perfectamente dimensionado para que el tornillo engrane perfectamente (90 mm de espacio entre dientes y 15 dientes en $\frac{1}{4}$ de circunferencia) (Figura 3.32). Sin estas dos condiciones satisfechas, la máquina no podría pivotar respecto al eje vertical.



Figura 3.32. Detalle del engranaje entre el tornillo sinfín y el engranaje a un cuarto.

El eje vertical pivotante presenta dos elementos más. Por un lado, la viga horizontal tiene un orificio pasante en el extremo opuesto a la barca, cuya finalidad es alojar la varilla metálica giratoria del mecanismo de corte, y por otra, en la parte inferior de la viga vertical existe una abrazadera cuya misión es también sostener la varilla de corte sin impedir su giro.

3.3.2.4. Modelado del sistema de corte

Como ya se ha mencionado más arriba, Betancourt ideó dos cabezas cortadoras dependiendo de las labores que se necesitase efectuar en el canal. El mecanismo hasta ahora diseñado es común a ambas cabezas, las cuales tenían la grandísima ventaja de ser intercambiables y fáciles de montar y desmontar de cara a su mantenimiento. Para efectuar un estudio lo más completo posible, se han modelado ambos sistemas que se muestran a continuación.

3.3.2.4.1. Mecanismo de corte para el cabezal de cuchilla doble

Se trata de un soporte circular de cuatro radios, dos de los cuales tienen un par de taladros para poder acoplar sendas cuchillas curvas que actúan de forma solidaria al soporte. En su centro hay otro taladro, algo mayor, por el que pasa la varilla del eje vertical rotatorio. Este eje móvil también gira solidariamente con el soporte de las cuchillas. El eje móvil presenta una peculiaridad prevista también por Betancourt, y es que cada 14,5 cm está taladrado. Estos taladros tienen el objetivo de fijar un engranaje troncocónico al eje. Con ello, el ingeniero consigue tres objetivos: la profundidad del plano de corte se puede modificar; el centro de gravedad del mecanismo de corte se puede situar a la altura del eje pivotante, de modo que, la barca no se balancee al inclinar el eje vertical para trabajar con un ángulo determinado; y por último, el taladro más cercano a la parte inferior del eje sirve para fijar el soporte de las cuchillas de manera rápida y sencilla mediante un perno (Figura 3.33).



Figura 3.33. Perspectiva axonométrica del mecanismo de corte de doble cuchilla.

Quedaría por modelizar la manivela que impulsa todo el mecanismo de corte (Figura 3.34). Como se comentó anteriormente, la viga horizontal del eje pivotante tiene un perno de madera dispuesto para introducir una potencia en forma de T hueca que sostiene una manivela. Esta manivela tiene el alma de madera, pero la parte del mango es metálica para evitar su desgaste. En el extremo del eje horizontal de la manivela hay otro engranaje troncocónico que se mueve solidariamente con la manivela. La relación entre dientes de los engranajes troncocónicos es $(11/8)$, de manera que se facilite algo la maniobra del operador sobre la manivela. Las dimensiones de la manivela son adecuadas para vencer el gran momento de inercia que posee el soporte circular con las cuchillas.

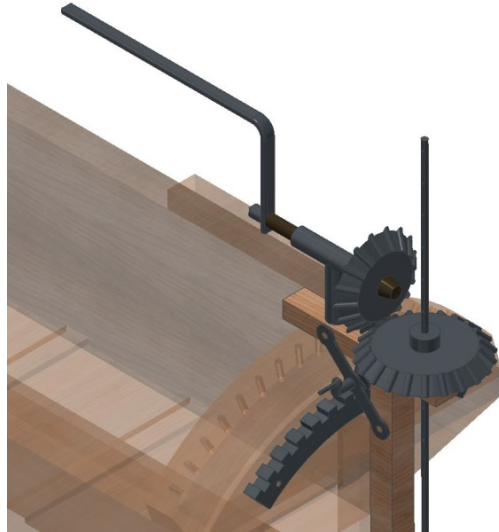


Figura 3.34. Detalle del mecanismo de manivela con los dos engranajes troncocónicos.

3.3.2.4.2. Mecanismo de corte para el cabezal de cuchilla simple

Se trata de un soporte lineal con un par de taladros para poder acoplar una cuchilla en forma de azada. Esta cuchilla actúa también de forma solidaria al soporte. En su extremo hay un agujero por el que se inserta el eje vertical rotatorio. Este eje móvil gira solidariamente con la cuchilla y es exactamente el mismo empleado para el cabezal de doble cuchilla, y confiere al cabezal de cuchilla simple las mismas características que al de cuchilla doble.

Por último, la manera de maniobrar de la cuchilla simple es mucho menos articulada que la cuchilla doble ya que no se pretende que gire. Para ello, se necesita una palanca en forma de timón terminada en un engranaje a un cuarto de circunferencia recto. La palanca está taladrada para poder ser colocada en el perno de madera del eje vertical pivotante. La relación entre engranajes es distinta al caso anterior. La inercia de la cuchilla simple es mucho menor que la de la cuchilla doble por lo que se puede usar una relación de desmultiplicación mucho menor que en el anterior caso (13/32). Esto significa que un pequeño giro en la palanca mueve considerablemente la cuchilla simple (Figura 3.35).



Figura 3.35. Perspectiva axonométrica del mecanismo de corte simple.

3.3.2.5. Ensamblaje final

El resultado final del modelado y ensamblaje de las distintas partes se presenta en la Figura 3.36. La imagen presentada (frame) es fruto de la renderización del modelo gracias a Inventor Studio, aplicación que incorpora el propio software.



Figura 3.36. Frames de la máquina con sus distintos cabezales.

Para ensamblar el ingenio, se fija la barca, ya que va a ser el verdadero soporte de toda la maquinaria. El espejo de popa tiene tres pernos y un agujero destinados a dos importantes piezas, un engranaje recto a un cuarto y el bastidor fijo de la máquina. En primer lugar, se va a fijar el engranaje a un cuarto a los pernos, y para ello se define una restricción de coincidencia respecto a los taladros del engranaje y de oposición respecto a los planos de contacto. Acto seguido, se inserta la estructura de bastidor en forma de L en el agujero del espejo de popa realizado para tal fin. Para ello, hay que determinar una restricción de coincidencia en dicho agujero. Como todavía presenta un grado de libertad respecto al eje longitudinal de la

embarcación, éste hay que restringirlo al apoyar la parte vertical del bastidor al apoyarse en el espejo de popa.

Sobre esta pieza que se ha denominado bastidor fijo, hay que insertar el eje horizontal sobre el que pivotará la maquinaria de corte. El eje puede girar libremente en el taladro del bastidor, pero su geometría impide que tenga mayor libertad de movimientos. Para definir esto, se debe definir una restricción de coincidencia respecto al agujero, y otra de oposición a los planos de contacto.

Seguidamente es el eje pivotante el que hay que ensamblar. De nuevo, se define una restricción de coincidencia entre el agujero del eje vertical del eje móvil y el eje horizontal, y de oposición entre los planos de contacto. De este modo, el eje pivotante gira con libertad respecto al eje horizontal. Por otro lado, en el extremo inferior del eje pivotante hay un taladro practicado. Por este punto se inserta la abrazadera que va a sostener el eje vertical rotatorio. Para la abrazadera, de nuevo, se define una restricción de coincidencia respecto al taladro y de oposición respecto a los planos de contacto. En principio esta abrazadera puede girar libremente, pero cuando se inserte en ella el eje rotatorio perderá este grado de libertad.

El eje vertical hay que alinearlo en primer lugar respecto al eje pivotante, ya que facilitará mucho las operaciones siguientes. De nuevo, se definen dos restricciones de coincidencia respecto al agujero de la abrazadera y al taladro practicado en la parte superior del eje pivotante. Estas restricciones hacen que el eje pueda rotar con libertad y se pueda mover libremente respecto al eje vertical.

A continuación, se introduce el cabezal de corte en el extremo inferior del eje rotativo. Previamente a este paso se han ensamblado también los dos cabezales a los que se ha hecho referencia. Este sencillo ensamblaje se hace también mediante pernos y se usa, como se viene haciendo, una restricción de coincidencia respecto al agujero y de oposición a los planos de contacto, permitiendo que las cuchillas y sus soportes funcionen solidariamente. Como se decía, el soporte de las cuchillas tiene un agujero sobre el que hay que definir la restricción respecto al eje rotativo antes comentada. A partir de ahora, las cuchillas se mueven solidariamente respecto al eje vertical rotativo.

Queda por ensamblar la parte superior del mecanismo. En primer lugar, se inserta el engranaje superior en el eje vertical rotativo, y para ello, se restringe por coincidencia respecto al agujero y por oposición a la cara superior de la viga horizontal del eje pivotante. Este engranaje se mueve solidariamente con el eje vertical. Además, no importa qué cabezal se esté usando, la restricción es la misma tanto si se usa el engranaje troncocónico como el engranaje recto.

Para hacer pivotar el eje móvil se utiliza, como se indicaba al principio, el engranaje recto situado en la popa de la barca. En primer lugar, se insertan las dos escuadras en su posición, restringiendo por coincidencia sus taladros con los pernos que el eje pivotante tiene para tal fin. Además, para evitar el movimiento respecto a un eje transversal hay que introducir en cada escuadra una restricción por oposición con las caras en contacto del eje pivotante. Una vez se tiene el eje, hay que insertar el tornillo sinfín entre las dos escuadras, y para ello se usará la misma restricción de coincidencia con los taladros que hay para este fin en su centro. El tornillo sinfín tiene un rebaje en su eje para poder ajustar esta zona al taladro de la escuadra. Para que la simulación sea realista, hay que definir también una restricción de oposición de una de las caras del eje del tornillo con una de las caras de la escuadra, eliminando así la posibilidad del movimiento en la dirección respecto a un eje transversal. De este modo, el tornillo sinfín puede girar libremente movido por la manivela que hay en su extremo izquierdo.

La parte más delicada del ensamblaje es la de la simulación del movimiento del tornillo sinfín respecto al engranaje recto a un cuarto. Para ello, hay que definir una restricción respecto al giro

de la manivela del tornillo sinfín y al engranaje recto a un cuarto. Esta restricción tiene direcciones perpendiculares ya que mientras la manivela gira en un plano, el engranaje está en otro perpendicular. Autodesk Inventor Professional permite esta relación de giro, de manera que, por cada vuelta de la manivela del tornillo sinfín el engranaje giraría un diente. El engranaje a un cuarto tiene 15 dientes, si fuera un engranaje completo serían 60 dientes, por lo que la relación de movimiento es $1/60$ (60 vueltas de manivela serían necesarios para girar el eje pivotante 360°).

Finalmente, quedaría por ensamblar el mecanismo de movimiento de la máquina. Esta parte sí es diversa atendiendo a cada tipo de cabezal, como ya se comentó anteriormente.

Si el cabezal es simple, basta con restringir el taladro que hay en la zona media de la palanca al perno que hay en la parte horizontal del eje pivotante. La restricción sería exactamente igual a las comentadas con anterioridad. La única novedad al respecto, es que los engranajes de la palanca y de la parte superior del eje rotatorio también deben funcionar engranados. Para ello, basta con definir una restricción respecto al giro (uno horario y otro anti-horario) con una desmultiplicación $12/32$ como se comentó al modelizar esta pieza (Figura 3.35).

Si el cabezal es de cuchilla doble, entonces el ensamblaje es algo más complicado. En primer lugar, hay que ensamblar la potencia en T en el perno anteriormente mencionado. Para fijarlo hay que restringir primero haciendo coincidir el agujero inferior de la potencia con el perno, pero además, como no se desea que gire libremente, hay que restringir las caras opuestas, y por último, uno de los agujeros verticales para que su dirección sea siempre paralela al espejo de popa.

El siguiente paso es introducir el eje horizontal de la manivela por el agujero de la potencia, por lo que se vuelve a restringir este eje con el agujero. Esta pieza, así definida, gira libremente pero además tiene libertad de movimiento en el eje longitudinal. A continuación, se acopla el mango metálico de la manivela. En el extremo de dicho mango hay un taladro por el que pasa el eje, la restricción, como todas las de este tipo, es por agujero entre el eje horizontal y el taladro de la manivela. Este taladro no es circular para evitar el giro, por lo que también se restringen por oposición las caras en contacto consiguiendo así que se muevan solidariamente.

Por último, se inserta el engranaje troncocónico. Para ello se restringe el eje horizontal con el taladro del engranaje por agujero, después se hace por caras al extremo del eje horizontal que tiene un tope y en dirección contraria se restringe con la cara vertical de la potencia en T. De este modo, se fijan tanto el eje como el engranaje impidiendo su movimiento en la dirección longitudinal. La última restricción que hay que definir es entre los engranajes troncocónicos. Esta restricción se hace respecto al giro, teniendo en cuenta que van a girar en planos distintos, (como entre el tornillo sinfín y el engranaje a un cuarto). Por ello, se definen en sentidos contrarios (horario-antihorario), y con una relación de desmultiplicación de $11/8$ (11 vueltas de manivela son 8 de las cuchillas) como se observa en la Figura 3.34.

3.3.3. Ingeniería Asistida por Ordenador

3.3.3.1. Preprocesado

Esta primera etapa en el análisis estático tiene como objeto simplificar el modelo de cara a facilitar el análisis computacional, y para ello, se van a realizar una serie de suposiciones eliminando del conjunto componentes que no van a intervenir en el análisis. La máquina de por sí es bastante sencilla, por lo que no se ha simplificado ningún elemento estructural. Sin embargo, el análisis se va a realizar prescindiendo de algunos esfuerzos.

En primer lugar, se va a considerar que la barca está descargada, y a su vez, que no hay empujes del agua sobre el casco de la barca. Las razones para despreciar dichos esfuerzos son que ambos esfuerzos van a incidir fundamentalmente en la barca, y muy poco en la parte trasera, donde está el mecanismo. Además, ambos esfuerzos son contrarios y se contrarrestan al estar flotando la embarcación.

Asimismo, la modelización de los esfuerzos de empuje sobre el casco y la parte de la maquinaria de corte hundida son bastante costosos pues la superficie es compleja, y por otra parte, el mecanismo va a soportar mayores esfuerzos precisamente fuera del agua donde ningún empuje va a reducir la carga ejercida por la gravedad.

3.3.3.2. Asignación de materiales

Se trata del segundo paso en el análisis estático, asignando materiales a cada componente de la máquina. Los materiales aplicados al modelo 3D han sido hierro fundido y madera de abedul, asignándose a través de la biblioteca de materiales del software Autodesk Inventor Professional. Así pues, las propiedades térmicas, mecánicas y de resistencia de los mismos, necesarias para realizar un análisis realista serán las indicadas en el software.

Los materiales empleados son los usuales en la época. Así pues, se ha tomado hierro fundido para los materiales metálicos, un material isótropo con un valor del módulo de Young de 120 GPa, un valor del módulo de Poisson de 0,30, y una densidad de 7.150 kg/m³. Para la madera se ha elegido madera de abedul ya que éste era uno de los materiales empleados para la fabricación de embarcaciones. La madera es un material ortótropo y habrá que distinguir sus características dependiendo de la dirección en la que se encuentre la veta de la misma. El módulo de Young estimado es de 16,3 GPa, el módulo de Poisson de 0,70 en la dirección paralela a la veta y 0,43 si es perpendicular a ésta y, por último, una densidad de 550 kg/m³.

3.3.3.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del mecanismo van a desvelar el porqué del diseño de la maquinaria de corte proyectada por Agustín de Betancourt y Molina. La Figura 3.37 muestra las 3 posiciones de trabajo de la invención. A la izquierda, como el eje está en posición vertical la máquina es estable y trabaja correctamente. En el centro en cambio, al girar el eje vertical, provoca que el centro de gravedad se desplace, por lo que, para equilibrar el sistema, la barca se inclina como se muestra a la derecha.

Para que esto no ocurra, se debe obligar al eje vertical a que el momento producido por la parte superior, sea igual al producido por la parte inferior. En otras palabras, se necesita que el centro de gravedad de la máquina esté siempre lo más cerca posible del eje sobre el que gira el eje vertical.

Para ello, hay otra solución, que es la diseñada por Betancourt y que evita tener que redimensionar los componentes. Se comentó con anterioridad que el eje vertical tiene orificios en toda su longitud que permiten alargar o acortar la profundidad a la que cortan las cuchillas. Gracias a esa graduación de profundidades siempre existe una para la cual el centro de gravedad está a la altura del eje de giro horizontal y, por lo tanto, siempre se puede trabajar en condiciones óptimas sin la menor inclinación de la barca.

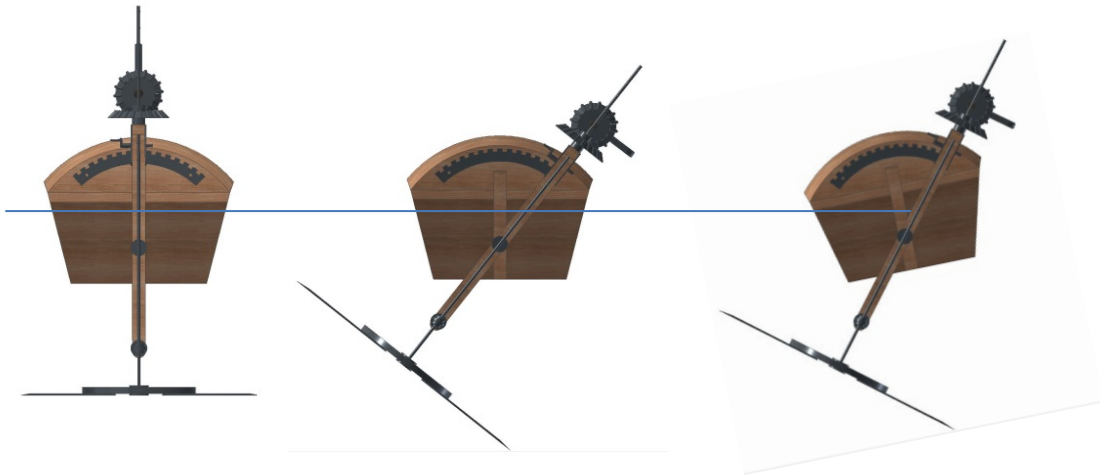


Figure 3.37. Posiciones de trabajo del mecanismo: óptima (Izda. y Centro) y en desequilibrio (Dcha.).

Por otro lado, en este apartado se definen las restricciones al movimiento de los componentes de la invención. Autodesk Inventor Professional incorpora 3 tipos de restricciones: fijas, como la que corresponde a la parte inferior de la barca, ya que se considera que está fuera del agua (Figura 3.38), sin fricción, en el caso de que algún componente tuviera algún grado de libertad para moverse en una determinada dirección, y por último, de rodadura, como son la de todos los componentes que giran del presente ingenio (Figura 3.39).

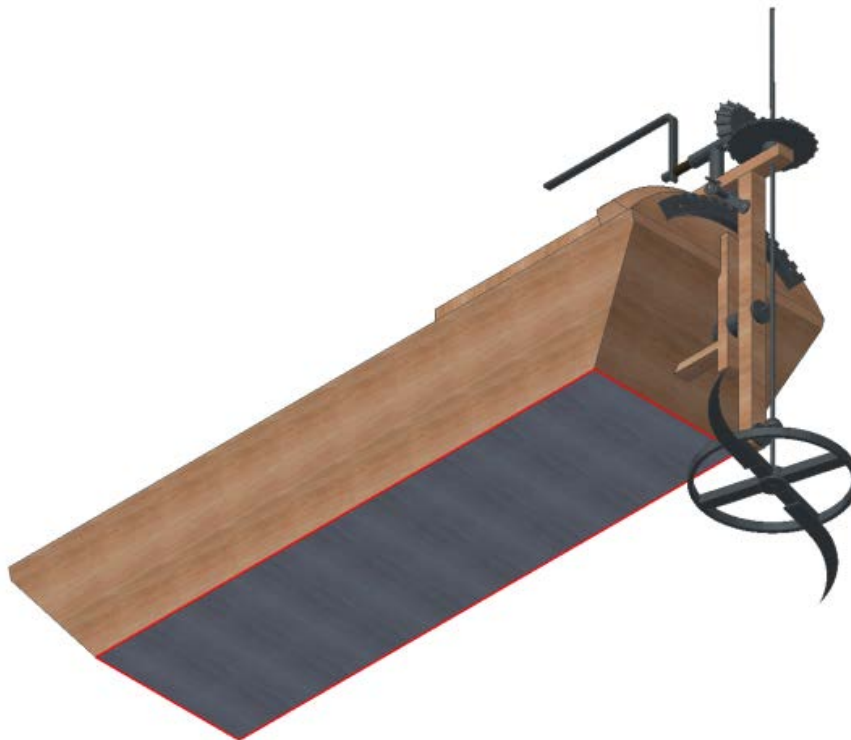


Figure 3.38. Restricciones completas de movimiento: partes fijas.

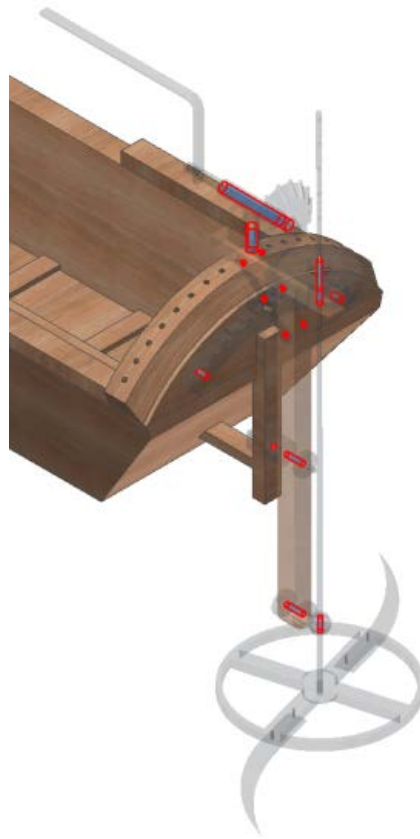


Figure 3.39. Restricciones de movimiento parcial: rodadura libre.

Además de lo visto anteriormente, el software calcula automáticamente los contactos entre las piezas, por lo que no hay que definirlos. Sin embargo, hay que definirlos manualmente debido a la difícil geometría de algunos de sus componentes; en concreto, el contacto entre los engranajes troncocónicos, así como el contacto entre el tornillo sinfín y el engranaje a un cuarto fijo (Figura 3.40).

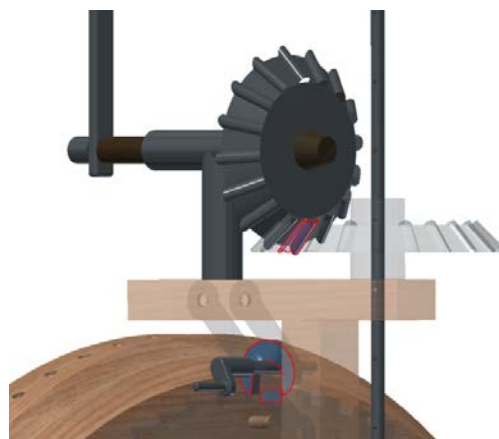


Figure 3.40. Apoyos rotatorios aplicados.

3.3.3.4. Fuerzas aplicadas

Respecto al análisis de fuerzas, podemos distinguir fundamentalmente dos tipos de fuerzas: por un lado, las derivadas de la acción de la gravedad sobre el mecanismo, y por otro, dos grupos de fuerzas contrapuestas que tienen que ver con los momentos de inercia que tienen lugar en la manivela y en las cuchillas.

Las cargas gravitatorias se disponen automáticamente en el conjunto del mecanismo. Para ello, se define un vector de módulo $9,81 \text{ m/s}^2$ en sentido negativo del eje Z. Al definirlo así, el software lo representa automáticamente en el centro de gravedad del conjunto (Figura 3.41).

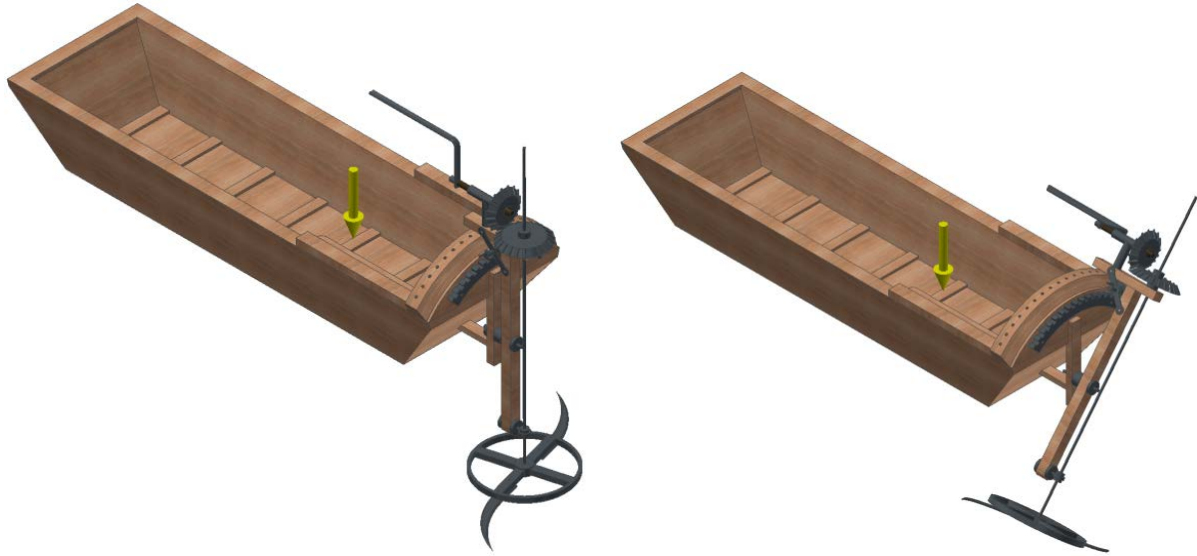


Figure 3.41. Fuerzas aplicadas sobre el modelo 3D en sus dos posiciones extremas.

El segundo grupo de fuerzas se deriva de la acción de corte de las cañas y otras plantas acuáticas del fondo de los canales. Para realizar esta acción, la persona encargada de maniobrar la barca gira con su brazo la manivela encontrando oposición de las cuchillas al cortar las hierbas. Asimismo, puede ocurrir que en el instante en el que la fuerza ejercida por el brazo sobre la manivela fuera mayor, la cuchilla se encuentre con un obstáculo insuperable (piedras, el relieve del fondo, etc.), y se detenga repentinamente. Es precisamente esta situación la más desfavorable de cara al mecanismo y la que debe llevar a un estudio de rotura. Para representar estas dos fuerzas contrapuestas se ha decidido hacerlo a través de dos momentos iguales aplicados en dos lugares distintos.

El primero, aplicado sobre el engranaje troncocónico, sería el momento que se deriva de la fuerza aplicada sobre el eje horizontal móvil al mover la manivela. Dicho momento (M_1) sería:

$$M_1 = F_1 \times d$$

Donde F_1 , es la fuerza máxima capaz de realizar el operario sobre la manivela, y d , la distancia de la manivela al centro del eje. Supongamos que una persona, por tomar un extremo, fuera capaz de levantar con un brazo 50 kg. Esa fuerza aplicada a una manivela sería equivalente a:

$$F_1 = P \cdot g = 50 \text{ kg} \times \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} = 490,5 \text{ N}$$

Como el radio de la manivela es de 442.5 mm entonces el momento M_1 será tal que:

$$M_1 = 490,5 \text{ N} \times 0,4425 \text{ m} = 217.046 \text{ Nm}$$

En la situación antes descrita, para que se produzca el bloqueo de las cuchillas debe existir un momento contrario que establezca la situación de equilibrio (M_2). Este segundo momento del eje vertical, igual en magnitud, pero de sentido contrario al generado por el brazo, afecta a todo el eje vertical, y se localiza sobre las cuchillas como se muestra en la Figura 3.42.

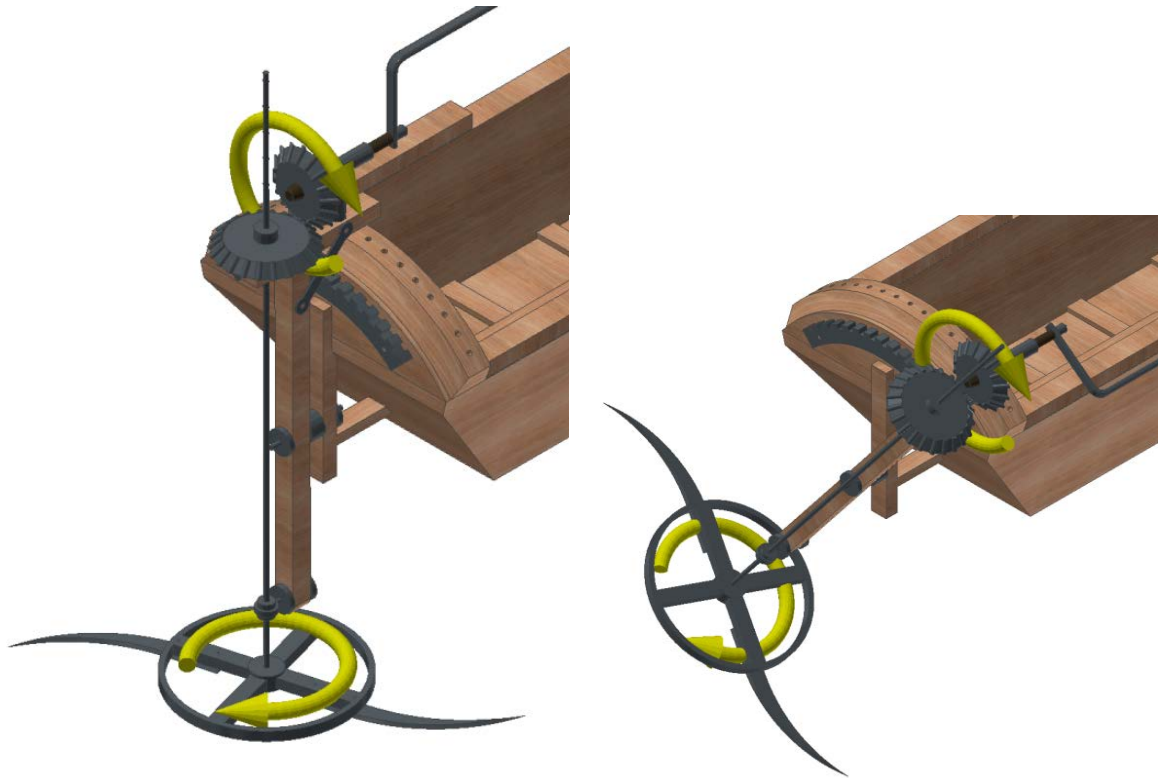


Figure 3.42. Momentos aplicados sobre el modelo 3D en sus dos posiciones extremas.

3.3.3.5. Discretización o mallado

El paso previo a la simulación es la discretización del modelo. Autodesk Inventor Professional genera automáticamente una malla tetraédrica estándar que se adapta a la geometría del modelo (Figura 3.43), detectando el tamaño de los elementos más pequeños, y proporcionando en estos componentes, una malla mucho más refinada. Aun así, es conveniente realizar un ajuste automático en las regiones que se presumen van a recibir valores de tensión más altos, para que los resultados sean más fiables.

En el caso de estudio, los parámetros de la discretización automática utilizados han sido: un tamaño medio de la malla con valor de 0.1 veces el cuadrado delimitador, un tamaño mínimo con valor de 0.2 veces el tamaño medio, un factor de modificación de 1.5, y un ángulo máximo de giro de 60° .



Figure 3.43. Mallado automático del modelo 3D en sus dos posiciones extremas.

Si se observa la malla en los lugares comprometidos del modelo (Figura 3.44), se puede comprobar que la discretización en dichos lugares es suficiente, por lo que se considera que no es necesario ajustar manualmente su refinamiento en los mismos.

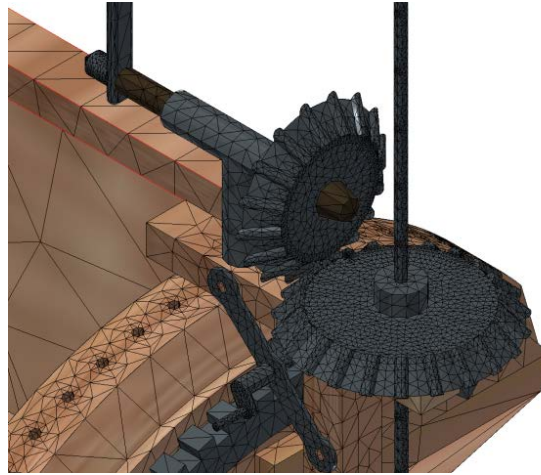


Figure 3.44. Detalle del mallado refinado en la parte superior del modelo 3D.

3.3.3.6. Resultados y discusión

Finalmente, una vez realizada la simulación del mecanismo se muestran los distintos resultados del análisis estático: distribución de tensiones de Von Mises, de desplazamientos, de deformaciones y coeficiente de seguridad. Asimismo, para un estudio lo más completo posible, se estudia el mecanismo en sus dos posiciones extremas: en una posición centrada y en una posición extrema, o posición de giro máximo del eje.

Los resultados de la distribución de tensiones de von Mises se pueden apreciar en las Figuras 3.45 a 3.48. Así pues, y observando de manera general el modelo, se comprueba que el modelo está sometido a tensiones bajas en las dos posiciones estudiadas (Figura 3.45).

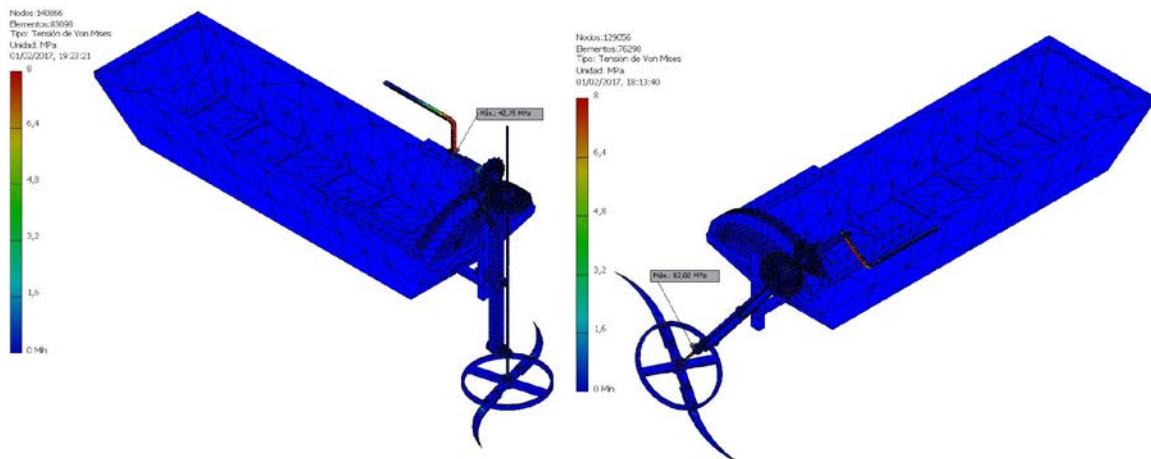


Figure 3.45. Distribución de tensiones de von Mises en sus dos posiciones extremas.

Particularmente, es en la posición de giro máximo donde se encuentran las mayores tensiones como cabría esperar (Figura 3.46), estando el punto de mayor tensión en el encuentro del eje con la abrazadera que lo une al bastidor vertical (82,02 MPa), y encontrándose en la manivela, otro punto con alto valor de tensión (61,05 MPa).

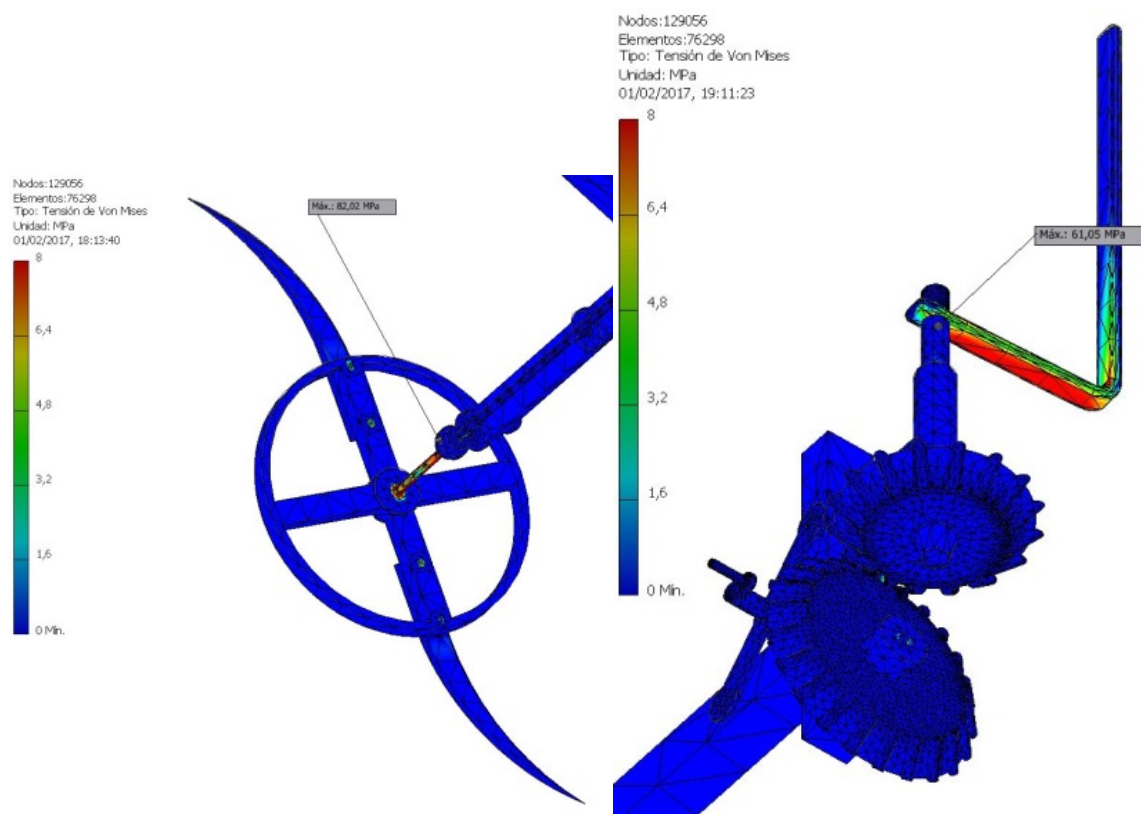


Figure 3.46. Valores máximos de la tensión de von Mises en la posición con inclinación máxima.

Cuando el eje se encuentra en la posición centrada las tensiones son mucho menores (Figura 3.47). Las mayores tensiones se concentran en la manivela (42,79 MPa), presentando el encuentro entre el eje y la abrazadera del bastidor un valor de la tensión mucho menor (15,51 MPa).

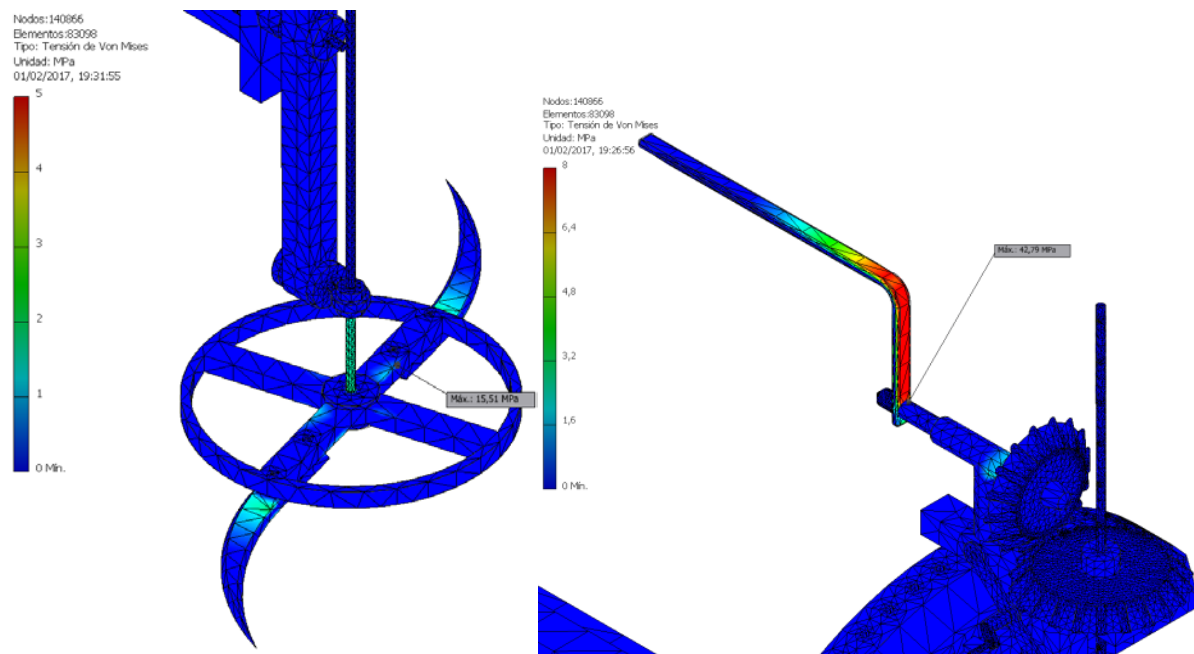


Figure 3.47. Valores máximos de la tensión de von Mises en la posición centrada.

Además, se puede señalar un punto con solicitaciones que conviene analizar. Se trata del punto de contacto entre los engranajes troncocónicos de los ejes cuando el mecanismo se encuentra en

la posición extrema (Figura 3.48), mostrando un valor de la tensión de von Mises de 12,52 MPa. En cualquier otro punto, ningún valor de la tensión supera los 5 MPa.

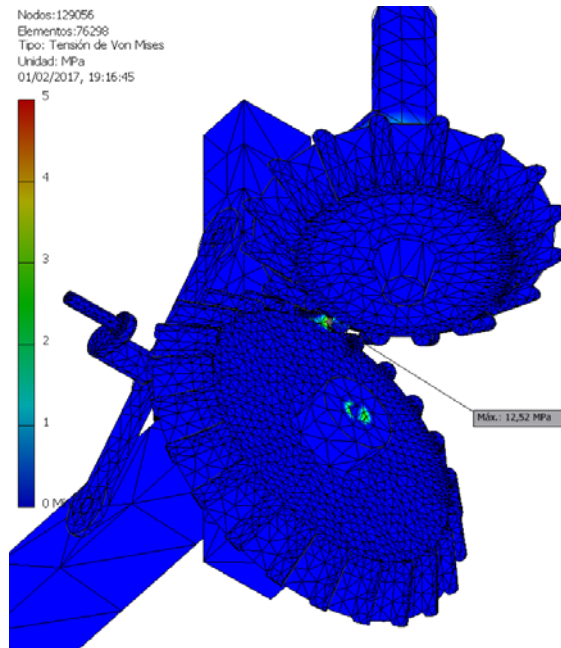


Figure 3.48. Tensión de von Mises entre los engranajes troncocónicos con el eje inclinado.

Finalmente, cabe decir que las tensiones máximas observadas se dan en piezas metálicas, aunque con valores muy lejos de los 758 MPa (límite elástico del hierro fundido), y de igual forma, tampoco las piezas de madera tienen tensiones que se aproximen a los 56,3 MPa (límite elástico de la madera de abedul).

El estudio de los desplazamientos máximos tampoco arroja resultados preocupantes. En la Figura 3.49, se muestra para las dos posiciones estudiadas, que los mayores desplazamientos tienen lugar en la manivela cuando el eje vertical está centrado (4,696 mm) y en el extremo de la cuchilla en la posición extrema (5,236 mm). En ambos casos los desplazamientos son casi despreciables.

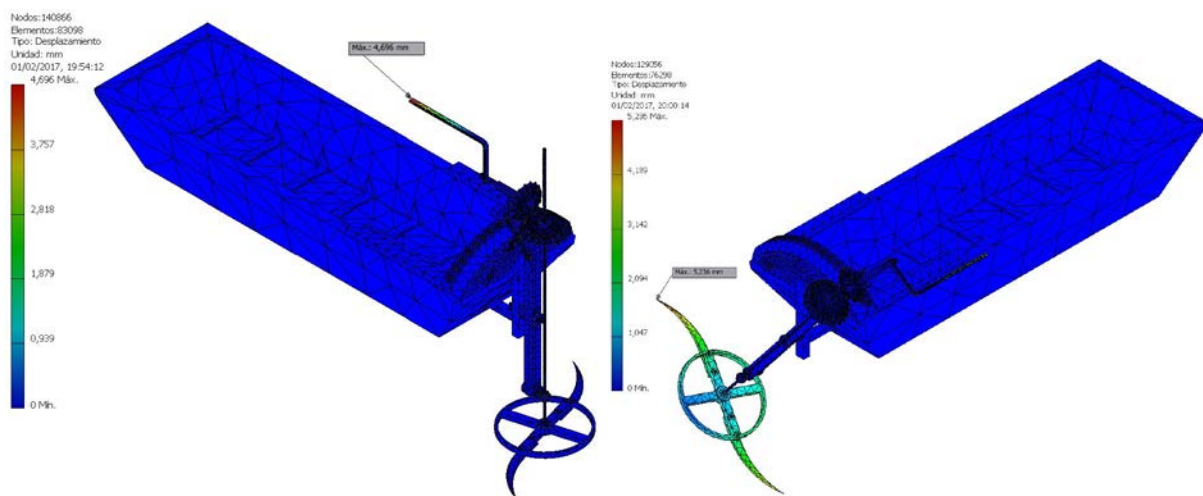


Figure 3.49. Distribución de desplazamientos en sus dos posiciones extremas.

Las deformaciones equivalentes tienen una relación bastante cercana a los puntos donde las tensiones de von Mises son mayores. Dado que los valores máximos de dichas tensiones están

lejos del valor de límite elástico, las deformaciones equivalentes son muy pequeñas (Figura 3.50).

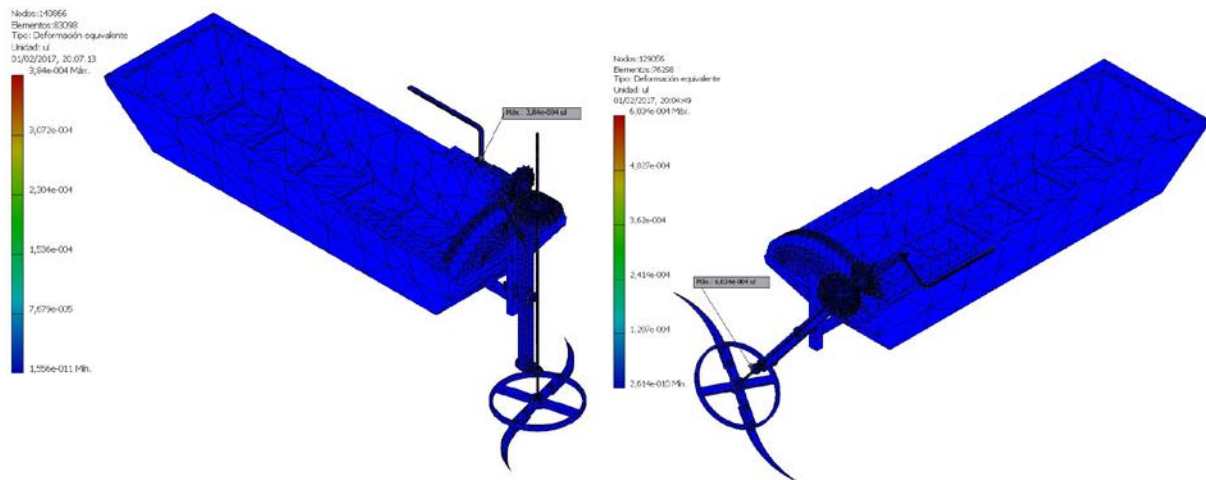


Figure 3.50. Distribución de deformaciones equivalentes en sus dos posiciones extremas.

La Figura 3.51 muestra el resultado del análisis del coeficiente de seguridad. En este caso, las partes más propicias al fallo serían la manivela, concretamente la inserción de la manivela en el eje horizontal móvil con un valor de 8,77, y el punto de contacto del eje vertical de las cuchillas con la abrazadera del bastidor vertical con un valor de 9,24.

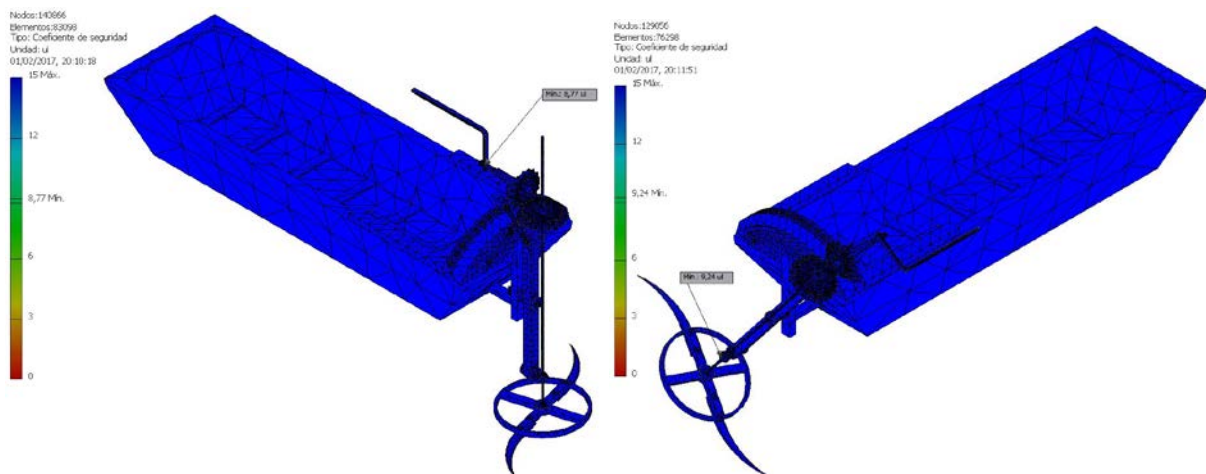


Figure 3.51. Coeficientes de seguridad en sus dos posiciones extremas.

De cualquier forma, todas las partes del mecanismo tienen un coeficiente de seguridad por encima de 9, por lo que la construcción del ingeniero español está ampliamente sobredimensionada.

3.3.3.7. Conclusiones

La presente investigación expone los resultados del análisis estático mediante técnicas de ingeniería asistida por ordenador (CAE) con elementos finitos de la máquina para cortar cañas y otras plantas acuáticas de los canales y ríos navegables diseñada por Agustín de Betancourt y Molina en 1795. Para ello, se ha partido del modelo CAD 3D realizado con Autodesk Inventor Professional, software paramétrico de diseño e ingeniería asistidos por ordenador.

El alto número de componentes, así como la complejidad del entorno del mecanismo (máquina flotante), ha justificado la simplificación de los esfuerzos a los que está sometida. Dicha

simplificación, que no afecta a los resultados del análisis estático realizado, permite que el volumen computacional sea menor. Sin esta simplificación, los resultados obtenidos no hubieran mejorado y el tiempo de simulación hubiera sido mucho mayor.

El análisis ha mostrado que las mayores tensiones que soporta el mecanismo tienen lugar cuando éste se encuentra en su posición extrema, es decir, cuando tiene su eje vertical girado a su posición límite, y particularmente, donde el eje toca con la abrazadera que lo une al bastidor. Sin embargo, los máximos desplazamientos tienen lugar en las zonas distales del mecanismo, es decir, en la manivela y en las cuchillas, como por otro lado cabía esperar. Asimismo, el análisis realizado muestra que el mecanismo está sobredimensionado, no alcanzando en ningún punto el límite elástico del material que podría afectar a sus propiedades, confirmando la acertada construcción de la invención histórica.

Así pues, dicha invención de la que se conoce que fue comparada con otras de la época (por lo que se podría deducir que llegó a funcionar), fue un ingenio consistente, original, innovador y perfectamente dimensionado, llamando la atención su extraordinaria sencillez y operatividad, por lo que presentaba innumerables ventajas debido a sus bajos requerimientos, mantenimiento y eficacia.

3.3.4. Impresión 3D

La impresión 3D de la máquina cortadora de cañas y otras plantas acuáticas ha sido la invención que menos dificultades ha presentado debido a su sencillez y al acierto de la escala escogida para su ensamblaje.

Tal y como se comentó en la primera invención, el paso previo a la impresión 3D es la conversión de los elementos en ficheros STL. En la presente invención, debido a la simplicidad del ingenio, se ha decidido exportar cada pieza individualmente. Hubiera sido posible exportar como ensamblaje algunos conjuntos, pero no presentaban un ahorro significativo de trabajo y, además, podría haber presentado el problema ya comentado de la posterior eliminación del soporte residual.

Asimismo, hay que indicar que se ha decidido modelar solamente la embarcación con un tipo de utensilio de corte. Entre los dos tipos de cuchilla y sistema de impulsión, se ha elegido el que podía presentar un mecanismo más complejo, como es el sistema de doble cuchilla.

Una vez recibidas los ficheros de cada pieza en formato STL, se ha decidido qué piezas convenía imprimir a mayor calidad y cuales tenían un nivel de definición suficiente con una impresión en PLA. Para ello ha sido determinante, de nuevo, la elección de escala. En esta ocasión, el elemento que ha determinado la escala de todo el conjunto ha sido la embarcación, disponiendo que ésta tuviera una longitud máxima no superior a los 22 cm, por lo que se ha elegido una escala de 1:25. Así pues, la embarcación y el soporte vertical móvil, se han impreso con la impresora Airwolf en PLA y el resto de piezas, que debían tener mayor definición para presentar el movimiento, se han impreso con la impresora Stratasys Objet 30 en resina fotosintética líquida.

El paso siguiente ha sido disponer las piezas en el simulador de impresión para determinar cuál era la mejor orientación, atendiendo siempre al criterio de obtener la menor cantidad de plástico soporte posible. Tras la impresión dos elementos se han considerado poco consistentes: el eje rotor vertical y las escuadras que unían el tornillo sinfín al soporte móvil. En el primer caso, se ha decidido redefinir el diámetro del eje duplicando su tamaño, y en el segundo se ha tomado una escala 1:20 en la dirección transversal de la pieza para tener mayor anchura. Salvados estos dos inconvenientes el montaje no ha presentado mayor dificultad (Figuras 3.52 y 3.53).

Por otra parte, el orden de montaje ha sido similar al que habría que hacer en la realidad. En primer lugar, la embarcación debe estar perfectamente montada y para ello hay que asegurarse que el bastidor fijo está perfectamente encajado en el agujero inferior de la embarcación. A continuación, es necesario fijar el engranaje a un cuarto en la popa del barco en su correcta posición, y para ello, la popa dispone de tres tetones que encajan con los agujeros del engranaje. Posteriormente, en la parte vertical del bastidor fijo se coloca el eje pivotante.

Asimismo, se monta el bastidor móvil al que se adhiere el ensamblaje del eje vertical rotativo con la estructura de las aspas. En la parte superior se colocan los engranajes y el mecanismo de manivela que mueve el eje rotativo, siendo importante asegurarse que los engranajes troncocónicos están perfectamente alineados y que engranan correctamente. Por último, se coloca el tornillo sinfín con las dos escuadras que lo fijan al bastidor móvil.

Una vez que todo el conjunto del mecanismo está montado, se inserta en el eje pivotante por el taladro practicado a tal fin, teniendo especial cuidado de que el tornillo sinfín quede engranado en el eje a un cuarto de la popa de la embarcación. Finalmente, se puede comprobar el funcionamiento del mecanismo moviendo tanto la manivela superior, que mueve las aspas, como la que está entre las escuadras que hace inclinar todo el mecanismo.

Los problemas de falta de rigidez del eje vertical rotatorio de la máquina cortadora no son extrapolables a la máquina real ya que los materiales empleados en esta zona son diferentes y su comportamiento es muy distinto. Al margen de esta observación que se deriva de los materiales empleados no se aprecia ningún inconveniente en la impresión 3D.



Figura 3.52. Vista general de la impresión 3D.



Figure 3.53. Detalle de los engranajes.

3.4. Molino de accionamiento hidráulico para la molienda del sílex

3.4.1. Introducción

La presente investigación se ha realizado apoyándose en el material que aparece en el sitio web del proyecto digital Betancourt (Betancourt y Molina, 1796b), expediente cuya información fue cedida para su digitalización por la Escuela Nacional de Puentes y Caminos de la Universidad ParisTech. Dicho expediente consta de una serie de láminas y de una memoria descriptiva que explica el funcionamiento del molino. En una de las láminas se puede observar un apunte en francés que dice: "*Plan d'un moulin a broyer le silex, applicable aux manufactures de faïence et projeté pour être exécuté sur la rivière Severn, à Coalbrookdale entre les emplacements ou se trouvent l'écluse a plan incliné et le pont de fer. Par Betancourt*". Esto se debe a que, durante la estancia de Agustín de Betancourt en Inglaterra (1793-1796), el ingeniero visitó la localidad de Coalbrookdale donde existía un puente de hierro que unía las localidades industriales de Broseley y Coalbrookdale.

Así pues, dado que la instalación de las industrias se debía a la localización de las materias primas como el carbón, la caliza, la arcilla o el mineral de hierro, y por otro lado, a la existencia de un río ancho y profundo para transportar las mercancías hasta el mar, se decidió instalar el molino para la molienda del sílex en dicha localidad, entre la esclusa de plano inclinado y el puente de hierro.

Básicamente, el funcionamiento del molino consiste en la existencia de una rueda hidráulica que acciona un árbol de transmisión que presenta 2 cojinetes con rodillos de fricción con una rueda cónica solidaria a dicho árbol, y que engrana con un piñón cónico que transmite el movimiento a otro árbol, y éste a su vez mediante una rueda cilíndrica transmite el giro a 4 piedras de moler situadas en la primera altura de la edificación gracias al concurso de 4 piñones cilíndricos.

Asimismo, las palas de la rueda hidráulica deben tener dos inclinaciones: una de 5 a 6 grados siguiendo una determinada anchura, para que las palas permitan salir el agua con menos resistencia, y otra de 3 a 4 grados a lo largo de una longitud, para que el agua ayude a colocar la rueda en el canal, cuando sea necesario retirarla del río.

La metodología empleada ha sido la restitución digital del modelo 3D utilizando como herramienta Autodesk Inventor Professional 2016, software paramétrico de diseño asistido por ordenador desarrollado por Autodesk, concretamente la versión 2016.

3.4.2. Diseño Asistido por Ordenador

El proceso de modelado tridimensional ha sido bastante complejo por la ausencia de información de detalle, tanto gráfica como descriptiva. Las láminas de la invención están dibujadas sin escala (salvo la planta), y por tanto, en dicho proceso se ha respetado la proporcionalidad midiendo sobre dichas láminas, para obtener un modelo CAD 3D fidedigno. Por ello, se han adoptado diversas escalas gráficas para que las dimensiones de los elementos del conjunto fueran las mismas en los diferentes planos, y dieran coherencia al mismo, permitiendo posteriormente un modelo consistente.

Aun así, ha sido necesario realizar algunas hipótesis dimensionales y geométricas, así como restricciones de movimiento, para que los elementos encajaran perfectamente. Es de destacar, la importancia que han tenido el diseño consistente de los engranajes cónicos y cilíndricos existentes en el modelo para el funcionamiento del ingenio, pues son los elementos clave para que dicho funcionamiento fuera real.

Como se ha indicado anteriormente, el software utilizado ha sido Autodesk Inventor Professional 2016 que permite crear de forma paramétrica los elementos de forma individual (.ipt), así como el ensamblaje de los mismos (.iam) constituyendo el conjunto del molino, e incluyendo las restricciones necesarias tanto de movimiento como de contacto, es decir, limitando los grados de libertad de los mismos.

Seguidamente, y como parte de los resultados obtenidos se muestran diferentes figuras. La Figura 3.54 muestra una perspectiva isométrica del molino con su ubicación respecto a la edificación en el que estaban ubicadas las piedras de moler, una perspectiva estallada o de montaje (Figura 3.55), donde se indica cómo se monta cada elemento para formar el conjunto del molino, y una perspectiva de conjunto con la inclusión de las marcas y su lista (Figura 3.56) mostrando todos los elementos del mismo.

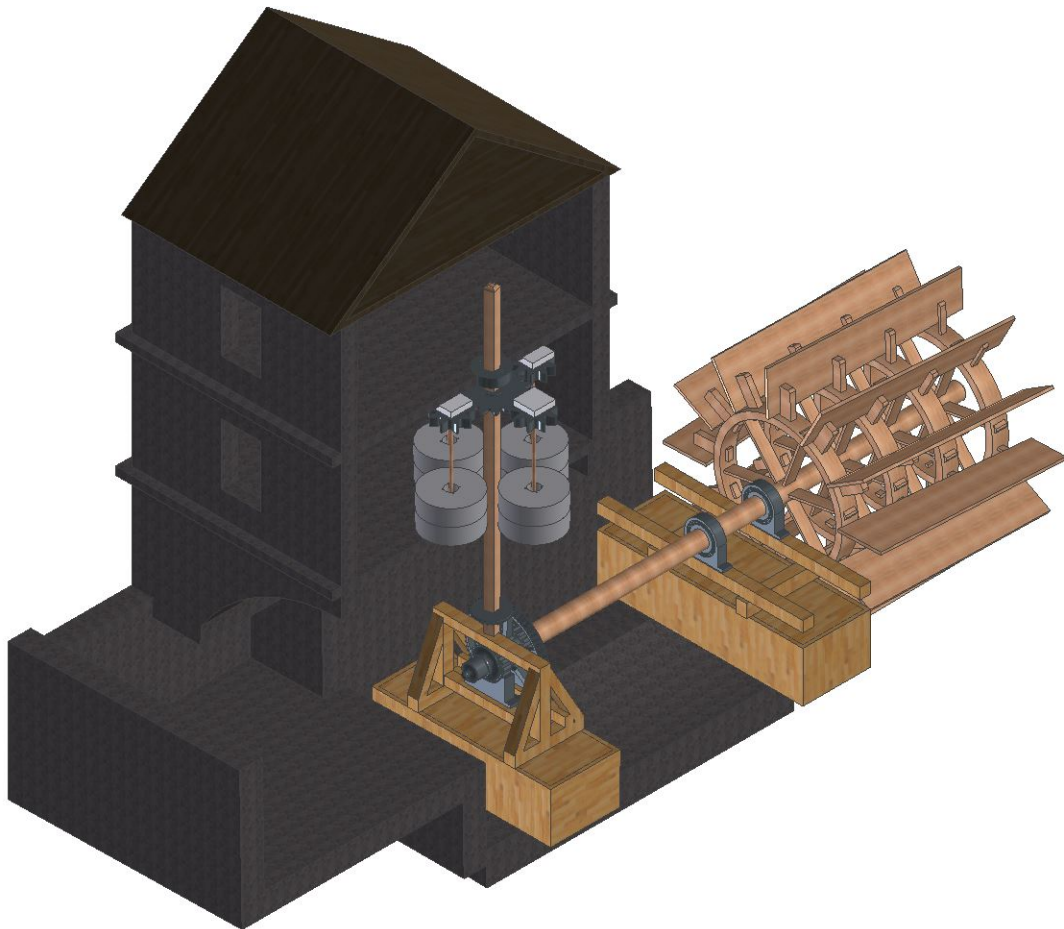


Figura 3.54. Perspectiva isométrica del modelo 3D.

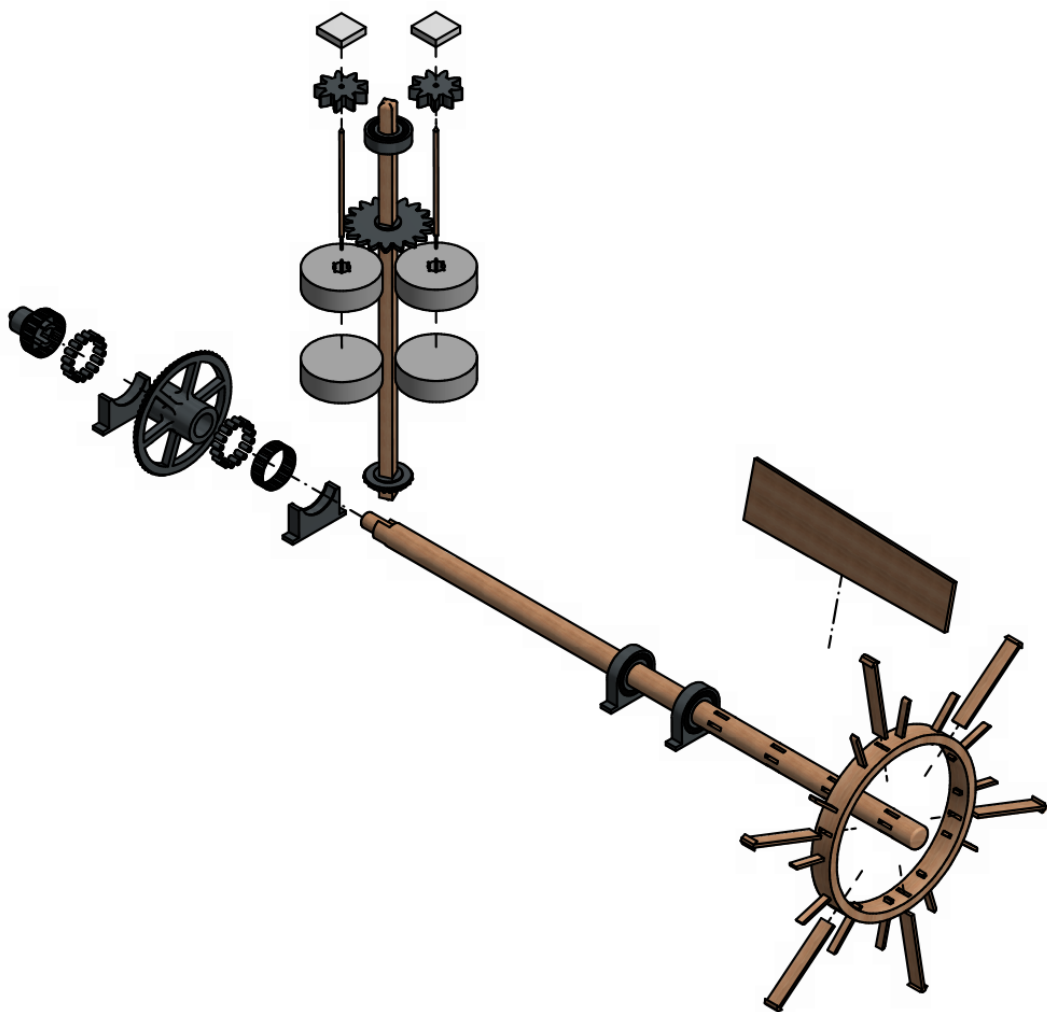


Figura 3.55. Perspectiva estallada del modelo 3D.

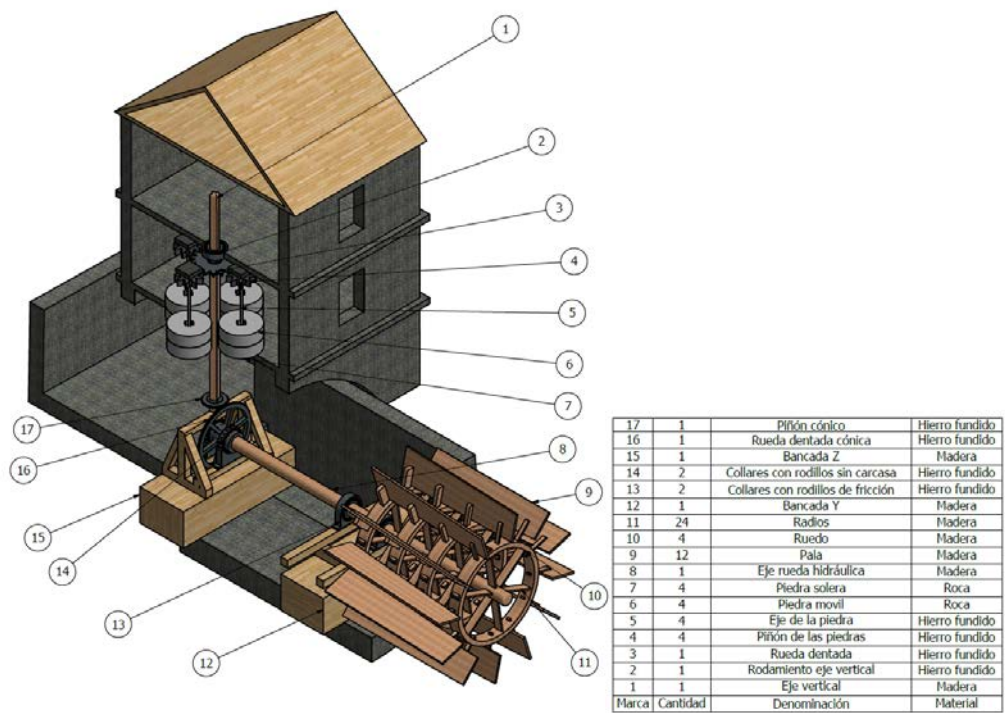


Figura 3.56. Plano de conjunto del modelo 3D.

3.4.2.1. Funcionamiento

Tal y como se observa en la Figura 3.56, el molino consta de un eje de la rueda hidráulica (8) que es accionada por la fuerza de una corriente de agua que incide sobre las palas (9). Éstas tienen dos inclinaciones diferentes para su correcto funcionamiento: una de 5 a 6 grados siguiendo una determinada anchura (respecto a un corte transversal), para que las palas permitan salir el agua con menos resistencia, y otra de 3 a 4 grados a lo largo de una longitud (respecto a un corte longitudinal), para que el agua ayude a colocar la rueda en el canal cuando sea necesario retirarla del río.

El eje de la rueda hidráulica, que es el eje de transmisión de todo el mecanismo, es móvil. Se encuentra flotando sobre el canal gracias a dos bancadas flotantes sobre las que se sostiene (12 y 15). Las bancadas abrazan el eje por medio de cuatro collares de fricción (13 y 14) que lo sostienen a una determinada altura y en el centro del canal, dependiendo de la altura del agua, pero que permiten el movimiento en su dirección longitudinal. El eje presenta una rueda dentada cónica (16) que sólo se mueve solidariamente con el eje cuando éste tiene la rueda hidráulica sobre el río. Para ello, la rueda dentada presenta una geometría que encastra con la del eje hidráulico cuando éste está extendido. La rueda dentada engrana a su vez con un piñón cónico (17) que transmite el movimiento al eje vertical de transmisión (1) ya que está unido al mismo solidariamente. En el extremo superior del eje vertical hay una rueda dentada unida solidariamente al eje y que transmite el movimiento del eje vertical a 4 piñones rectos (4) que están situados sobre las piedras de moler. Los piñones rectos se encuentran en el extremo del eje de cada una de las piedras (5) y están unidos solidariamente. El otro extremo del eje está unido solidariamente también a la piedra volandera del molino (6).

Aparte del conjunto de transmisiones, lo novedoso del modelo proyectado por Betancourt fue idear una estructura flotante de modo que el eje horizontal fuera móvil. Esto permite replegar el eje lo que da lugar a 2 posiciones límite del mecanismo: extendido y replegado (Figura 3.57). Como consecuencia de ello, se facilitarían tanto la retirada de la rueda hidráulica de la corriente del río cuando ésta fuera demasiado fuerte, como las labores de mantenimiento de la rueda y los mecanismos de transmisión.

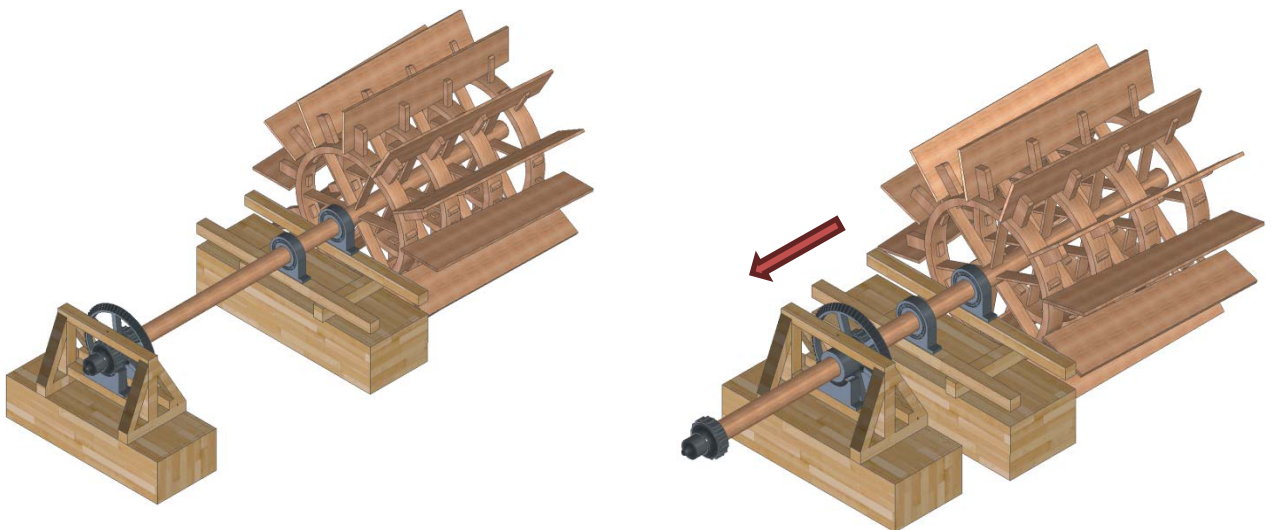


Figure 3.57. Posiciones límite: mecanismo extendido (Izda.) y mecanismo agrupado (Dcha.).

3.4.2.2. Modelado de la estructura impulsora (rueda hidráulica y árbol horizontal)

El mecanismo para la molienda del sílex ideado por Betancourt, es semejante al de muchos de los molinos hidráulicos para la fabricación de harina que hubo en Europa, pero con una serie de modificaciones que lo hacen del todo singular. En primer lugar, el mecanismo impulsor puede

adoptar dos posiciones como se ha comentado más arriba. Esto lo distinguiría de cualquier otro molino de rueda horizontal ya que suelen tener su rueda hidráulica fija en el curso fluvial. En un molino hidráulico común, el mecanismo para detener la rueda es parar la corriente de agua mediante una compuerta que impida que ésta incida en las palas. En cambio, el ingeniero canario dispuso de un sistema de poleas que facilitaba la aproximación o alejamiento de las bancadas sobre los que se apoya el eje horizontal, retirando así del agua la rueda hidráulica como se ha mencionado anteriormente.

Para su correcta modelización ha sido necesario dividirla en varias partes. Por un lado, se ha modelado el eje horizontal junto con la rueda hidráulica, por otro, las bancadas, y por último, los rodamientos que fijan el eje horizontal a la bancada. De cara al proceso de diseño la parte más delicada ha sido la modelización de la rueda vertical. El eje horizontal, de grandes dimensiones, tiene en su parte exterior adosada una rueda hidráulica. Ésta está compuesta de 4 ruedas unidos al eje por 6 radios. Los ruedos sostienen un total de 12 palas las cuales tienen la peculiaridad de tener una doble inclinación. Toda la rueda vertical está hecha en madera, y está ensamblada geométricamente de modo que las piezas encajan unas en otra sin necesidad de usar otro tipo de sostén como se puede observar en las Figuras 3.58 a 3.60.

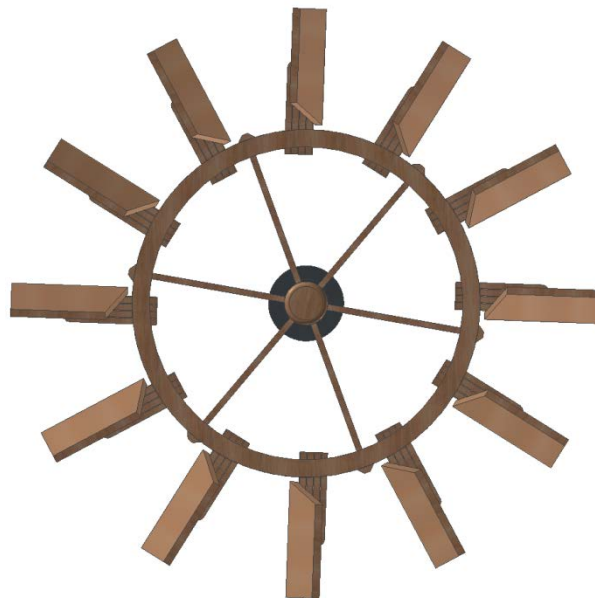


Figura 3.58. Vista de perfil de la rueda hidráulica.

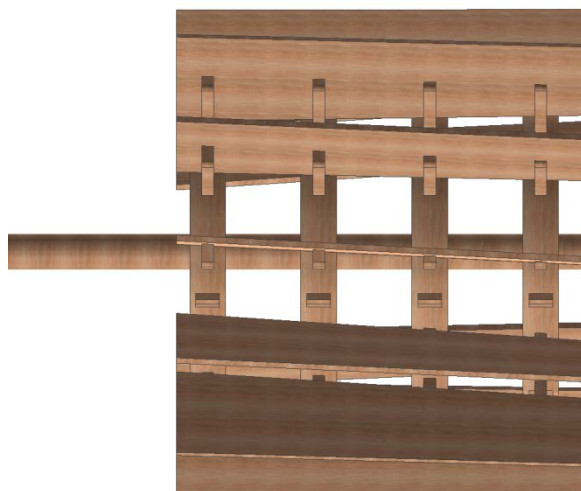


Figura 3.59. Alzado de la rueda hidráulica.

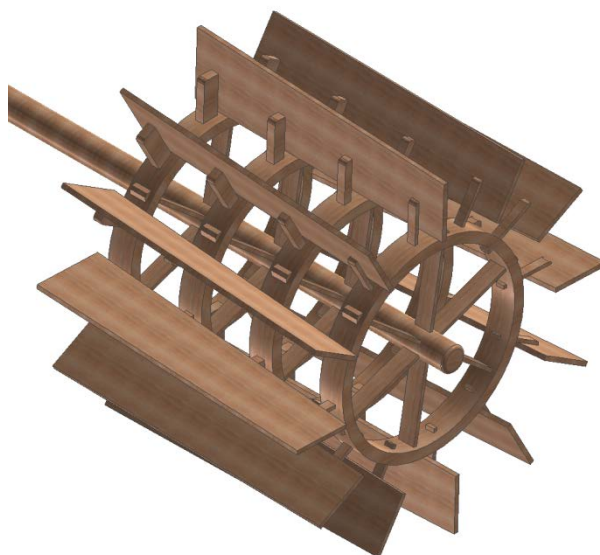


Figura 3.60. Perspectiva axonométrica de la rueda hidráulica.

El extremo contrario, el más alejado del curso fluvial, está rematado por una pieza metálica en forma de campana terminada en punta (Figura 3.61). Esta pieza metálica está troquelada para que encaje con el engranaje troncocónico cuando el eje se lleva a la posición extendida. De este modo, se consigue que el engranaje trabaje de forma solidaria cuando se extiende y, por el contrario, se muevan independientemente cuando el eje está agrupado.

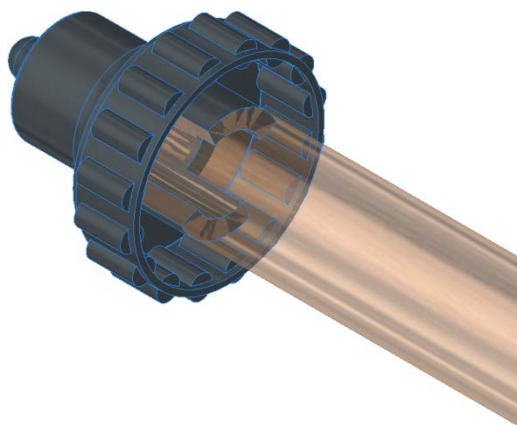


Figura 3.61. Perspectiva axonométrica de la campana y su collar asociado.

Por último, se ha modelado la rueda dentada cónica. Esta pieza circular de grandes dimensiones funciona como un volante metálico. La zona central está unida a la exterior mediante seis radios metálicos. La zona exterior, donde están los dientes, es troncocónica y tiene unas dimensiones bien determinadas (64 dientes y 2,3 m de diámetro). La rueda está diseñada para que no se mueva respecto al eje horizontal. El eje horizontal debe girar en el interior del seno la rueda de modo independiente y solamente cuando la campana del extremo del eje se acople a la rueda, eje y engranaje girarán solidariamente. Para ello, la rueda tiene una geometría que se acopla perfectamente con la campana metálica del árbol de transmisión horizontal como muestra la Figura 3.62.

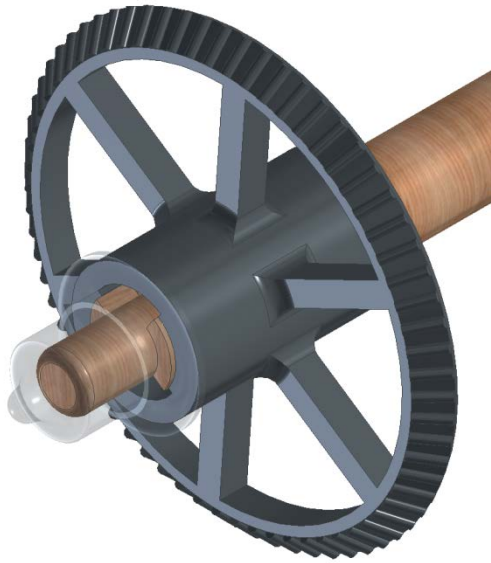


Figura 3.62. Perspectiva axonométrica de la rueda dentada cónica.

Para que el eje horizontal gire sin rozamiento es necesario cuidar sus apoyos. Con este objetivo Betancourt pensó en 4 grandes rodamientos o collares que funcionasen abrazando el eje en distintos lugares. Pero cada uno de ellos tiene un papel propio y, por lo tanto, su diseño tiene particularidades. Por un lado, dos rodamientos de rodillos, los que descansaban en la bancada exterior móvil, tienen por misión sostener y facilitar la rodadura del eje horizontal (Figura 3.63).

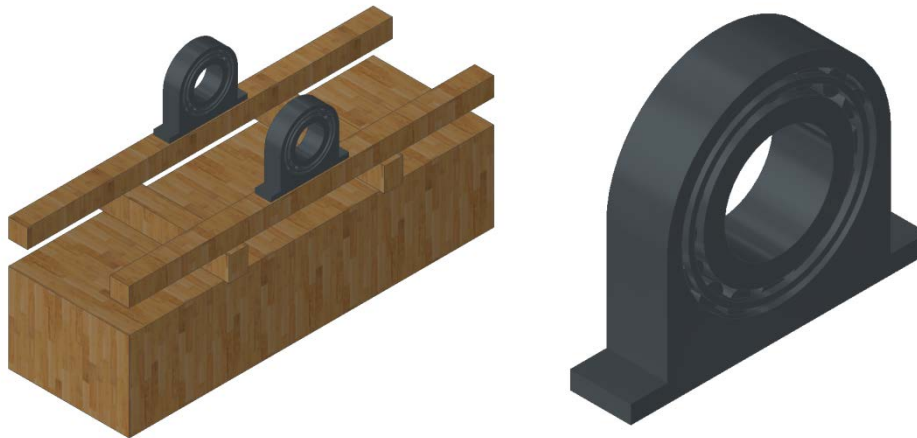


Figura 3.63. Collares de la bancada exterior en su posición (Izda.) y detalle del rodamiento (Dcha.).

Por otro lado, otros dos rodamientos de dimensiones algo mayores, están situados en la cabecera del eje, pero no fijan el eje sino la rueda dentada cónica, y sirven para facilitar la rodadura (Figuras 3.64 y 3.65). Para ello, el rodamiento más cercano a la campana está unido solidariamente a ésta (Figura 3.63). Estos dos collares se diferencian de los otros en que no tienen un anillo exterior (carcasa) que los retenga, y además sus estructuras de apoyo no son similares. El collar unido a la campana puede moverse en la dirección del eje, y el soporte sólo le sirve para limitar que se mueva hacia el curso fluvial una vez acoplado a la rueda dentada cónica. Por el contrario, el otro collar tiene limitado los movimientos en la dirección del eje, pero no así el movimiento vertical, lo cual facilita las maniobras.

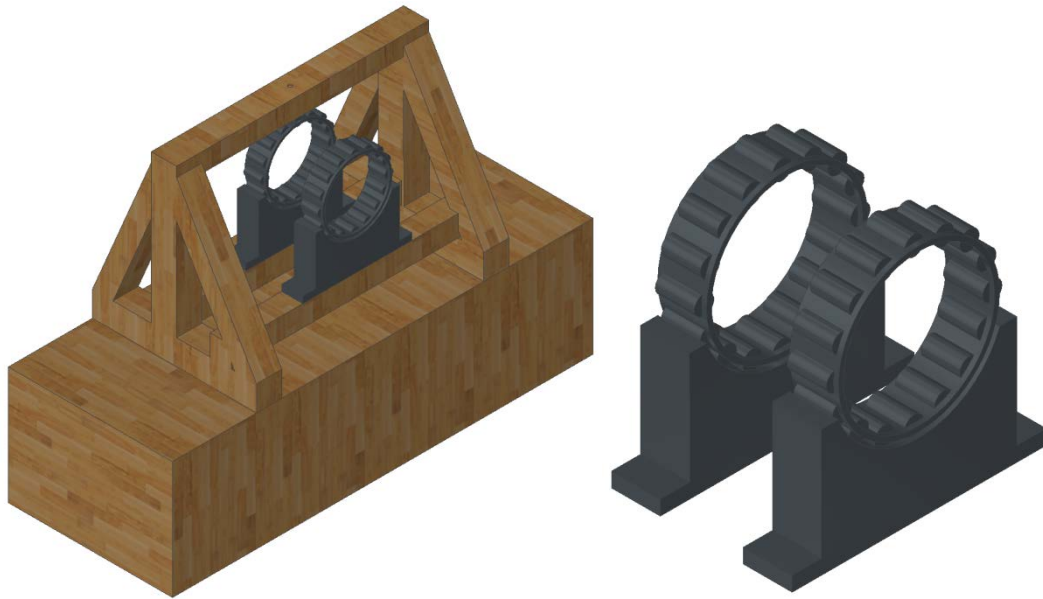


Figura 3.64. Collares sin carcasa exterior (Izda.) y detalle de los rodamientos (Dcha.).

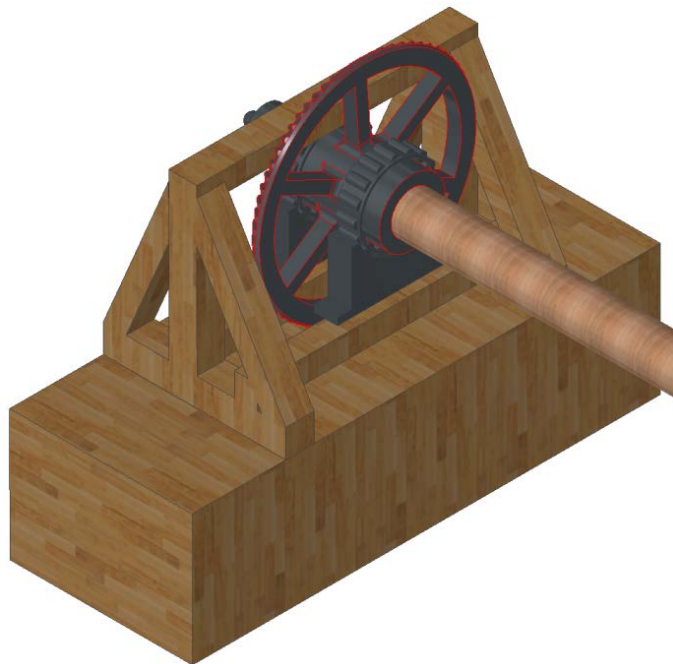


Figura 3.65. Perspectiva axonométrica de la rueda dentada cónica fijada por los collares.

3.4.2.3. Modelado de la estructura de molienda (árbol vertical y sistema molienda)

La estructura de molturación se muestra en la Figura 3.66. Esta estructura es algo menos compleja que la impulsora y se asemeja mucho a la de otros molinos de la época. De todos modos, tiene bastantes componentes y es preciso cuidar especialmente el ensamblado para que el modelo trabaje como el mecanismo original.

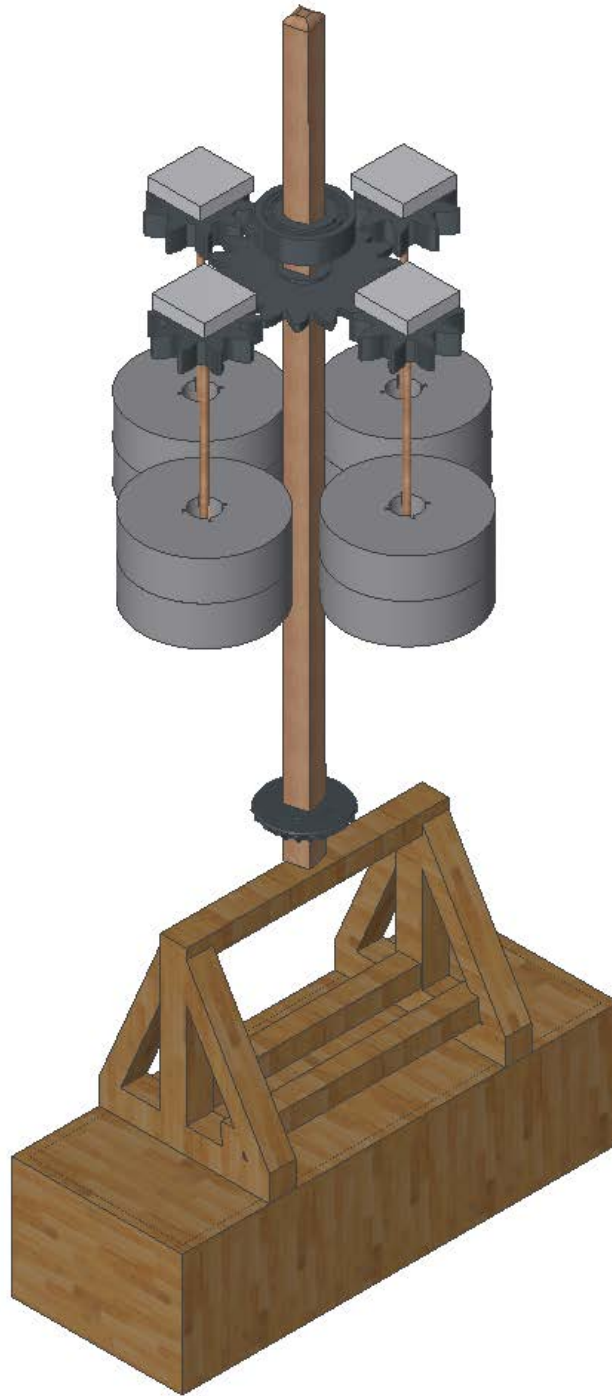


Figura 3.66. Perspectiva axonométrica de la estructura de molturación.

La primera pieza a modelizar es el eje vertical de madera que va a ser quien determine la geometría del resto de elementos. El eje tiene un engranaje troncocónico en su extremo inferior y otro cilíndrico recto en la parte superior. El engranaje troncocónico debe engranar perfectamente con el engranaje troncocónico del eje horizontal, el cual será el encargado de convertir el movimiento horizontal en vertical. La relación de ambos engranajes, a juzgar por las láminas es algo menor a $1/3$. Dado que el engranaje del eje horizontal es de 64 dientes, por tanto, el engranaje del vertical será de 18 dientes (Figura 3.67).



Figura 3.67. Perspectiva axonométrica del eje vertical con sus engranajes.

El engranaje recto del extremo superior engrana también con 4 engranajes cilíndricos rectos que transmiten el movimiento a las cuatro piedras volanderas. La relación entre estos engranajes es de $1/2$ por lo que la relación entre dientes debe ser $9/18$ (Figura 3.68).



Figura 3.68. Vista en planta de los engranajes rectos.

La piedra volandera está unida a un eje vertical propio de dimensiones menores que las del principal. En el extremo superior de ese eje de madera se encuentra el engranaje recto que engrana con el engranaje cilíndrico recto principal que transmite el movimiento (Figura 3.69). Como son cuatro las piedras a mover, el engranaje principal engrana a la vez, con cuatro engranajes satélites. Llama la atención la diferencia de anchura en los engranajes; el principal, es mucho más ligero mientras que los satélites tienen un ancho mucho mayor. La razón de ello estriba en que los engranajes sigan en contacto, aunque el eje vertical se mueva para separarse del eje horizontal que transmite el movimiento. El mecanismo permite realizar esta operación como maniobra de emergencia con el fin de detener rápidamente el movimiento de las piedras.



Figura 3.69. Perspectiva axonométrica de las piedras de moler con su eje propio.

Por último, para que todo el conjunto se mueva con la menor fricción posible, Betancourt establece que el eje principal vertical esté apoyado en un punto en el extremo inferior y esté insertado en un rodamiento de grandes dimensiones en su parte superior.

3.4.2.4. Modelado de la fábrica de ladrillo

La fábrica de ladrillo sirve de soporte a todo el mecanismo (Figura 3.70). Para la correcta visualización del mecanismo se ha modelado de forma seccionada. En principio sólo tiene una función estructural pero su diseño facilita que el mecanismo funcione correctamente. La fábrica consta de dos partes bien diferenciadas: el edificio de ladrillo que alberga la maquinaria para la molienda, y el canal que comunica el sótano del edificio con el curso fluvial.

El edificio es un edificio de dos alturas y un sótano. La planta superior tenía una función de almacenaje. Aquí se disponían tanto el elemento molturado y listo para su transporte como los diferentes repuestos y herramientas para el mantenimiento de la maquinaria.

La planta baja era propiamente la sala de molienda, aquí se encontraban las cuatro piedras de moler y la materia prima para su transformación (el sílex). Además, el molinero disponía en esta habitación del control de todo el mecanismo. El sistema de poleas para extender o recoger la rueda hidráulica se manejaba desde esta planta; además, también existía otra palanca para liberar el eje vertical del horizontal provocando su inmediata parada, y un mecanismo para cada rueda de cara a detener o hacer funcionar de forma independiente cada piedra volandera, acoplando o desacoplando los engranajes cilíndricos rectos de cada uno de los ejes de las piedras.

Por último, el sótano daba acceso al apoyo del eje vertical y a los engranajes troncocónicos de la bancada interior, y tenía un gran espacio diáfano para dar cabida al eje horizontal cuando éste se retiraba de la corriente. Estaba comunicado con el canal que estaba inundado hasta cierta altura, de manera que las bancadas que servían de apoyo, flotaban sobre el agua del canal. Además, era el lugar donde se encontraba la rueda hidráulica cuando se retiraba del río, por lo que era el espacio donde se trabajaba en su mantenimiento, debiendo ser suficiente la profundidad del agua para que las palas de la rueda hidráulica impactaran con el fondo.

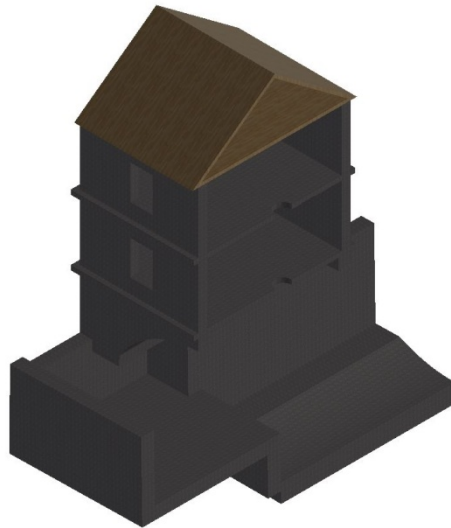


Figura 3.70. Vista de la fábrica de ladrillo soporte del mecanismo.

3.4.2.5. Ensamblaje final

El ensamblaje final es determinante para que el conjunto del mecanismo funcione correctamente y posteriormente pueda utilizarse para la simulación de los movimientos o para el análisis estático (Figura 3.71). Para lograr este objetivo es imprescindible guardar el orden lógico del ensamblaje.

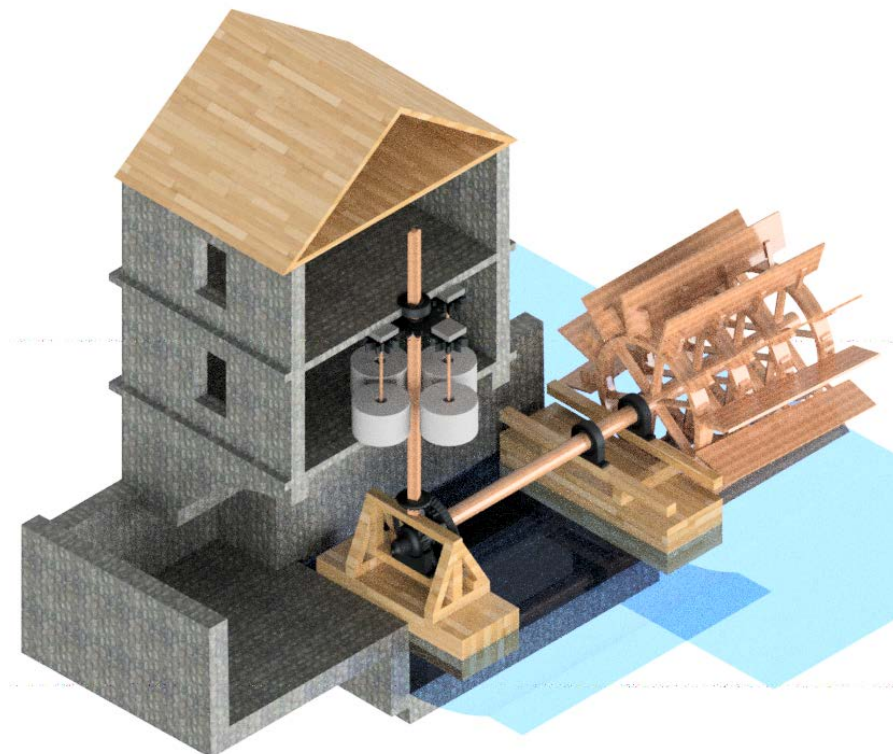


Figura 3.71. Imagen fotorrealista del ingenio ensamblado.

La primera pieza sobre la que hay que incorporar el resto es la fábrica de ladrillo. Sobre ella hay que incorporar las dos bancadas. Por un lado, respecto a la bancada interior hay que restringir su desplazamiento en las tres direcciones, de modo que funcione como si su cara inferior estuviera empotrada. Esto puede parecer que es contrario a las condiciones de contorno de la pieza, pero hay que tener en cuenta que, si bien no se trata de un elemento empotrado porque

tiene libre el movimiento en la dirección vertical, el empuje es tan grande que no existe un movimiento vertical. Por otro lado, respecto a la segunda bancada, hay que situarla a la misma profundidad que la primera, y tiene libre el movimiento en la dirección del eje horizontal por lo que se restringe permitiendo un grado de libertad en esa dirección.

Sobre la bancada exterior, y a continuación, se colocan los dos rodamientos fijándolos a la zona del bastidor como si estuvieran atornillados a él. Para ello se restringe por coincidencia en las tres direcciones haciendo que ambos elementos trabajen solidariamente. En la bancada interior, por el contrario, se hace lo mismo sólo con el apoyo del rodamiento ya que los rodamientos de esta parte deben tener algún grado de libertad más. Los soportes sí trabajan solidariamente a la bancada interior.

Una vez hecho esto hay que colocar el eje horizontal al que previamente se han unido solidariamente la campana y la rueda hidráulica, debiendo funcionar todo como un solo elemento. Este árbol horizontal de transmisión tiene una restricción de inserción respecto al agujero del rodamiento. Además, para que se mueva solidariamente con el rodamiento, hay que restringir por coincidencia respecto al movimiento longitudinal del eje, y también restringir la rotación del anillo interior del rodamiento para que los dos giren en el mismo sentido solidariamente.

El siguiente paso es ensamblar la rueda dentada cónica al eje horizontal. Sin embargo, hay que tener cuidado en restringir por inserción respecto al agujero del engranaje el eje horizontal, y no añadir más restricciones que ésta porque si no se eliminaría la libertad que tiene para moverse longitudinal e independientemente del árbol de transmisión.

Por último, quedan por ensamblar los rodamientos de la bancada interior. El rodamiento próximo a la rueda dentada, debe tener una restricción de movimiento por inserción al soporte del rodamiento. Además, hay que añadirle dos restricciones adicionales, una de coincidencia para evitar su desplazamiento respecto al eje longitudinal, y otra de rotación respecto a la rueda dentada cónica, para que ambos giren solidariamente. Al definirlo así, el rodamiento gira sin provocar el giro del eje horizontal que debe mantener independencia respecto de la rueda dentada cónica, siempre que la campana no esté acoplada como se explicará. El otro rodamiento es más sencillo de ensamblar pues basta con restringir por inserción y giro respecto al eje, obligándole a trabajar solidariamente respecto a la campana del árbol de transmisión horizontal.

Para que el engranaje troncocónico gire solidariamente con el eje se tienen que dar dos circunstancias. La primera es que tienen que estar activados los contactos del engranaje y de la campana, y la segunda es que tiene que estar en su posición extendida. De este modo, encajan sus geometrías y una pieza obliga a girar a la otra.

Terminado el ensamblaje de lo que se ha denominado estructura impulsora se comienza a ensamblar la estructura de molienda.

En primer lugar, hay que insertar el rodamiento circular en el hueco previsto para él en la solera del primer piso. Para ello se restringe por inserción respecto al agujero de la solera alineando la superficie superior del rodamiento con la del suelo del primer piso. Además, es importante impedir el movimiento del anillo exterior del rodamiento activando el contacto con la fábrica de ladrillo, pues de este modo sólo gira el anillo interior del rodamiento.

El siguiente paso es insertar el eje vertical en el rodamiento mediante una restricción por inserción y otra por giro, de modo que giren solidariamente. Además, en el extremo inferior del eje vertical, hay definir una restricción de coincidencia con la parte superior del soporte donde apoya, consiguiendo así que el eje vertical gire con libertad. Solidarios a este eje se encuentran dos importantes engranajes. Uno troncocónico en el extremo inferior que debe engranar con el

otro engranaje troncocónico, y otro cilíndrico recto en el extremo superior que facilitará el movimiento a las cuatro piedras volanderas. Ambos engranajes deben ensamblarse con una restricción de inserción en el eje vertical y otra de giro para que giren solidariamente. Para que se sitúen a la altura adecuada del eje vertical es importante tener en cuenta la posición del engranaje troncocónico y la posición de los engranajes rectos de las piedras de moler. Respecto al engranaje troncocónico, no será suficiente con una restricción de coincidencia respecto al extremo del eje, sino que también habrá que añadir una restricción de giro respecto al engranaje troncocónico horizontal, de modo que cada vuelta que dé el engranaje horizontal, produzca 4 vueltas en el vertical, atendiendo a la desmultiplicación de sus dientes. En cambio, para el engranaje cilíndrico recto, sí será suficiente con definir una restricción de coincidencia respecto a la parte superior, de modo que quede a la altura prevista.

El último paso es el ensamblaje de las piedras con sus ejes propios. Para ello, se deben ensamblar piedra volandera, eje y engranaje cilíndrico recto de manera solidaria. Así pues, bastará con restringir el eje por inserción en el agujero de la piedra volandera, obligarle a girar solidariamente y establecer una restricción de coincidencia con el fondo del agujero. Acto seguido se hace lo mismo en el extremo opuesto a la piedra entre el engranaje cilíndrico recto y el eje vertical propio. Con estas tres restricciones se consigue que giren solidariamente.

El siguiente paso es inmovilizar la piedra solera en su correspondiente sitio sobre el suelo del primer piso de la fábrica de ladrillo. Esta restricción debe hacerse por coincidencia y respecto a las tres direcciones, de modo que quede fija en un punto concreto. Al ser la piedra de geometría circular será necesario definir dos planos tangentes a la pared curva de la piedra para que el software pueda tomar una referencia respecto a las paredes del edificio. Una vez que se han restringido todos los movimientos sobre la piedra solera se coloca el sistema piedra volandera, eje y engranaje, y para ello, hay que definir una restricción entre ambas y otra de coincidencia entre sus caras. Esto hará que la piedra volandera, con su eje y engranaje, puedan girar libremente sobre la piedra solera que permanecerá fija.

Por último, se define la restricción entre los engranajes rectos del eje vertical y el de los ejes propios. Para ello, se restringe el giro de uno en oposición al de los otros teniendo en cuenta la relación entre el número de dientes, de modo que por cada vuelta que dé el engranaje principal, los engranajes de las piedras volanderas darán aproximadamente 2 vueltas.

3.4.3. Ingeniería Asistida por Ordenador

3.4.3.1. Preprocesado

Previamente al análisis estático a realizar, se deben realizar algunas suposiciones y simplificaciones técnicamente justificadas que ayudan a reducir los elevados requerimientos computacionales. Éstas son:

- No se ha considerado la construcción que albergaba a las piedras de moler.
- Para el análisis de tensiones se ha tenido en cuenta la situación más desfavorable, y por ello las piedras de moler se consideran en situación de parada, pues cuando el mecanismo está sometido al empuje del agua y las piedras paradas, se producen las mayores tensiones en el eje de transmisión ya que no puede girar libremente.
- Por otro lado, la acción del peso de los elementos de molienda recae sobre el forjado de la edificación que no se ha tenido en cuenta.
- No se han considerado las tensiones generadas en el árbol vertical de transmisión (eje vertical, engranaje cónico y engranaje cilíndrico recto), pues se sustituirán por una fuerza vertical.
- La estructura se encuentra sobre dos soportes de madera (bancadas) que flotan. Un primer análisis debe plantear si estas bancadas son capaces de soportar el peso del eje horizontal,

rueda y engranajes (incluso un eventual caso en el que el peso del eje vertical se deje apoyar en la bancada interior que soporta la rueda cónica que está unida al eje horizontal). Para el análisis estático, la bancada interior de madera se considerará fija en un determinado instante.

Así pues, el mecanismo de estudio será el formado por el árbol de transmisión horizontal del movimiento, utilizando como apoyos las dos bancadas de madera existentes (interior y exterior).

Por otro lado, la estructura sufre tensiones de manera distinta dependiendo de la posición en la que se encuentre, y, por ello, se ha decidido estudiar el mecanismo en ambas posiciones límite de funcionamiento, para determinar qué elementos presentan un estado tensional más desfavorable.

3.4.3.2. Asignación de materiales

El segundo paso en la preparación de la simulación consiste en la aplicación de materiales a cada uno de los elementos que componen el conjunto. Así pues, de la biblioteca de materiales que proporciona el software, se han elegido dos habituales para la época: hierro fundido y madera de roble, haciendo más realista el análisis estático perseguido, habida cuenta de la falta de información específica en dicho sentido. De esta forma, el software incorpora las propiedades térmicas, mecánicas y de resistencia de los mismos, necesarias para un análisis realista. Los materiales elegidos para la simulación son el hierro fundido para las piezas metálicas, con un comportamiento isótropo y con sus correspondientes propiedades físicas: módulo de Young (120.500 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (7.150 kg/m³) y tensión de rotura (758 MPa); y madera de roble para las piezas de madera, considerado como material ortótropo, con 3 valores diferentes del coeficiente de Poisson y del módulo de Young según la dirección, pero con un valor constante de densidad (760 kg/m³) y tensión de rotura (compresión paralela a la veta de 41 MPa).

3.4.3.3. Condiciones de contorno

Para establecer las condiciones de contorno en el mecanismo, antes de proceder a la simulación, es necesario formular la siguiente pregunta: si el conjunto del mecanismo descansa sobre dos apoyos flotantes o bancadas, ¿son capaces dichos apoyos de sostener el peso del mecanismo y del árbol vertical de transmisión cuando está apoyado en la bancada interior? Si no fuera así, la bancada tocaría el fondo del canal y las condiciones de contorno del mecanismo variarían por completo.

Sabiendo que las superficies sobre las que se apoyan las bancadas son de madera, se puede calcular el peso máximo que son capaces de soportar, estableciendo una posición de equilibrio entre el peso y empuje. Autodesk Inventor Professional permite medir las superficies de todos sus elementos, así como sus pesos una vez definidos los materiales de los mismos.

Así pues, el peso total del mecanismo y del eje vertical con sus engranajes es de $P = 275.823 \text{ N}$, y la superficie que soporta dicho peso es de $A = 20,675 \text{ m}^2$. Por otra parte, se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$P = E$$

$$E = V_{H_2O} \cdot \delta_{H_2O} \cdot g$$

$$V_{H_2O} = \frac{P}{\delta_{H_2O} \cdot g}$$

Siendo P el peso del conjunto, E el empuje desarrollado al sumergir el conjunto, V_{H_2O} el volumen de agua, δ_{H_2O} la densidad del agua, y g la aceleración de la gravedad.

Con estos dos datos (tomando los estándares de la densidad del agua 1.000 kg/m^3 y la gravedad $9,81 \text{ m/s}^2$), y de acuerdo con el Principio de Arquímedes, para equilibrar el peso anteriormente citado es necesario un empuje similar en la dirección contraria.

$$V_{H_2O} = \frac{275.823 \text{ N}}{1.000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = 27,582 \text{ m}^3$$

Así pues, un empuje vertical de 275.823 N sería el que realizaría un volumen de agua de $27,582 \text{ m}^3$.

A partir del volumen calculado, se puede conocer la profundidad necesaria para llegar al equilibrio, pues se conoce la superficie inferior A que soporta el peso. Así pues:

$$V_{H_2O} = A \cdot h$$

$$h = \frac{V_{H_2O}}{A} = \frac{27,582 \text{ m}^3}{20,675 \text{ m}^2} = 1,33 \text{ m}$$

Así pues, sería necesario hundirlas $1,33 \text{ m}$ para conseguir desalojar dicho volumen, y dado que ambas bancadas tienen un calado superior a $1,40 \text{ m}$, es por lo que la situación de equilibrio se alcanza, siendo suficientes para sostener el peso del mecanismo y el eje vertical con sus engranajes.

Conociendo todos estos datos, se aplican las condiciones de contorno o restricciones en el mecanismo. Autodesk Inventor Professional incorpora 3 tipos de restricciones: Fijas, que corresponde a la rueda dentada cónica y a la bancada interior que funciona como si estuviera empotrada; de rodadura, entre el eje y los rodamientos exteriores; y, por último, sin fricción, que sería el que tiene la bancada exterior, ya que tiene dos componentes fijas y una libre (Figura 3.72).

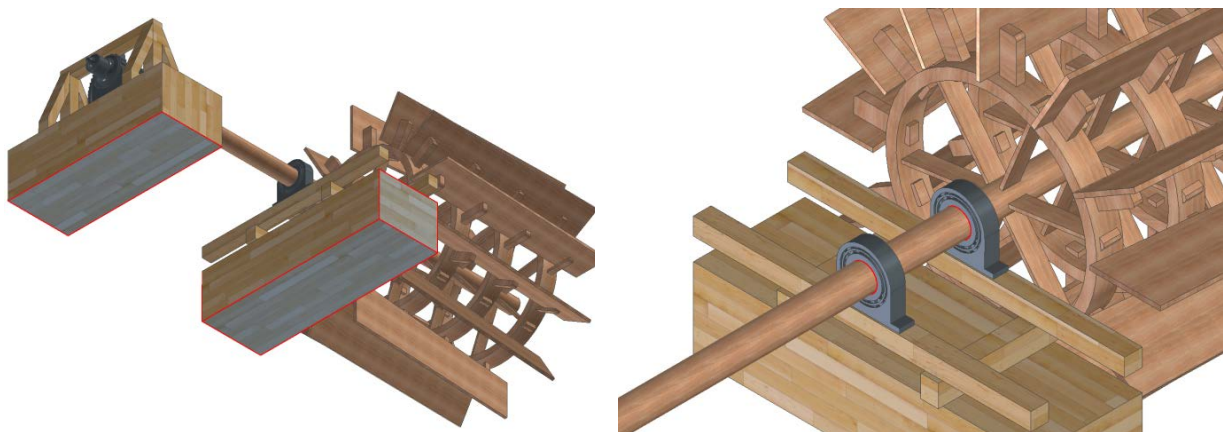


Figura 3.72. Restricción fija (bancada izda.), bidireccional (bancada dcha.) y articulada (rodamientos).

3.4.3.4. Fuerzas aplicadas

Las fuerzas aplicadas a considerar son tres: la presión ejercida por la corriente de agua sobre las palas de la rueda hidráulica (cuando la rueda hidráulica está expuesta a la corriente), la acción de la gravedad sobre el mecanismo objeto de estudio, y por último, el peso que sobre la bancada

interior ejerce el árbol vertical de transmisión del movimiento con todos sus elementos, que no se han considerado para el análisis estático, pero que sí forman parte del conjunto.

Para analizar la presión ejercida por la corriente de agua sobre las palas, es necesario indicar que dicho molino estuvo situado en el río Severn en Coalbrookdale (Inglaterra), por lo que será necesario calcular el valor medio de su caudal. Los niveles de aforo del río Severn son públicos (Environment Agency United Kingdom), por lo que se toma el caudal medio del mismo (Q) de 61,17 m³/s. Un segundo dato se ha tomado de la sección del río en el puente de hierro de Coalbrookdale, donde el río tiene un calado de 3 m homogéneo y una anchura de 30 m, por lo que se puede tomar una sección (A) de 90 m².

Por otro lado, la energía cinética que lleva el río en este punto es:

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2$$

Siendo m , la masa que transmite una cantidad determinada de energía, y v , la velocidad de dicha cantidad de agua. Además, se conocen las siguientes expresiones:

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$m = \delta \cdot V$$

Y sustituyendo en la ecuación de la energía cinética se obtiene:

$$Ec = \frac{1}{2}\delta V \left(\frac{Q}{A}\right)^2$$

Por otro lado, la presión (σ) que ejerce el río será el cociente entre la energía cinética Ec , y el volumen del agua que la contiene, V , de manera que sustituyendo las expresiones anteriores, se tendrá que:

$$\sigma = \frac{Ec}{V} = \frac{\delta Q^2}{2A^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1.000kg}{m^3} \cdot \frac{61,17^2 m^6}{s^2} = 230,97 Pa$$

Así pues, la presión media de incidencia por unidad de superficie es de 231 Pa.

Por otro lado, de la planimetría se puede apreciar que el agua impacta sobre 2 palas de la rueda hidráulica a la vez en sentido horario (Figura 3.73), y por simplicidad de cálculo, se va a suponer que afecta a toda la superficie de la pala.

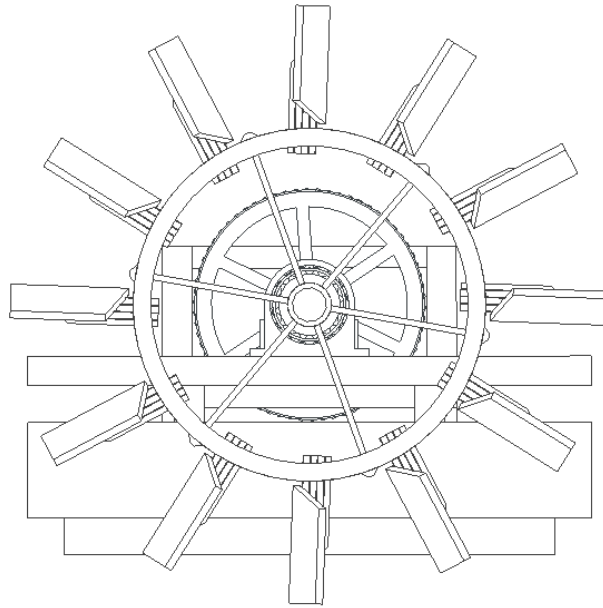


Figura 3.73. Disposición de las palas en la rueda hidráulica.

Sin embargo, las palas no son perpendiculares a la fuerza del agua, sino que presentan una inclinación de 3° y 30° respectivamente respecto al árbol horizontal de transmisión del movimiento, lo que permite descomponer la fuerza en sus componentes para determinar la fuerza en la pala inferior y en la superior (Figura 3.74).

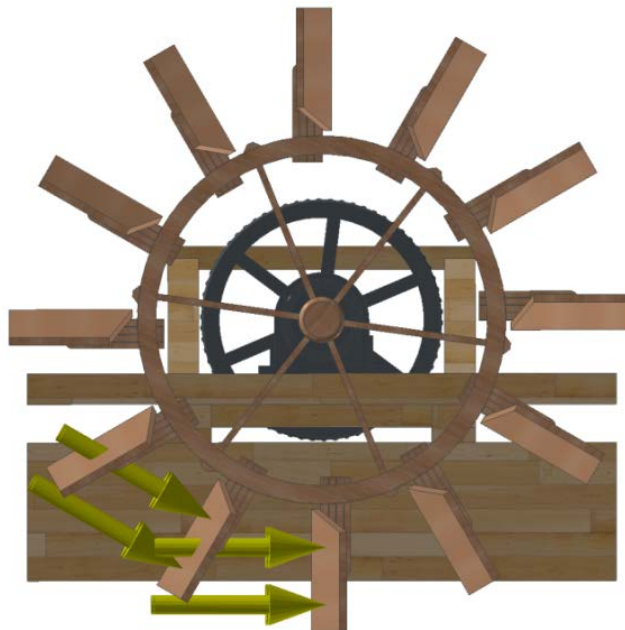


Figura 3.74. Fuerzas aplicadas en ambas palas.

En segundo lugar, se incluye una carga que es el peso del mecanismo, ubicada en su centro de gravedad, mediante la aplicación del vector de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) en sentido negativo del eje Z (Figura 3.75).

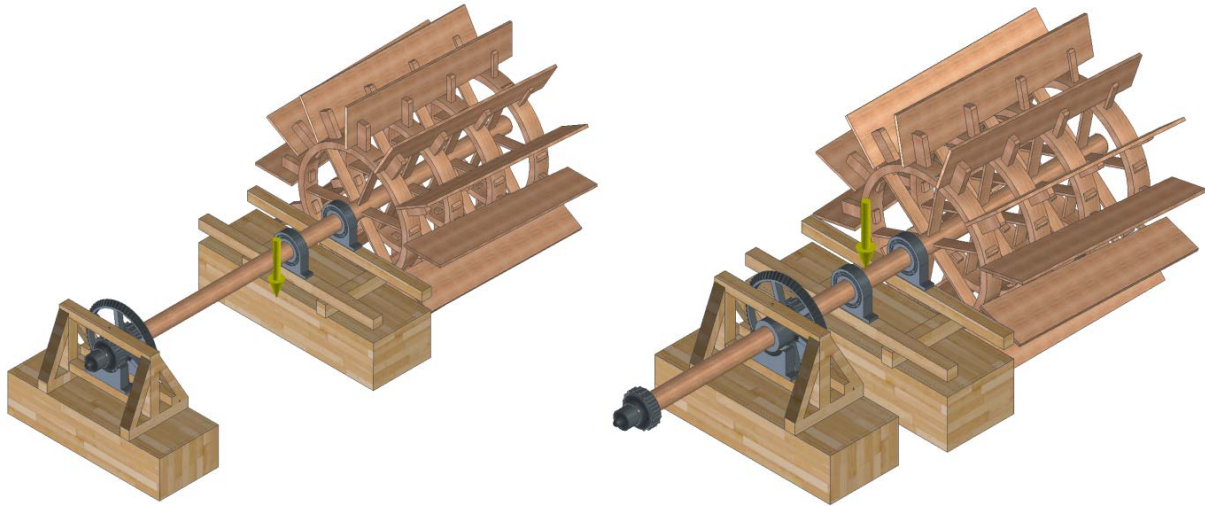


Figura 3.75. Aplicación del vector de la gravedad en el mecanismo según las dos posiciones límite.

Por último, faltaría aplicar el peso que produce el árbol vertical de transmisión del movimiento en la bancada interior. Tras conocer la masa de todos los elementos que lo componen, y una vez multiplicada por la aceleración de la gravedad, resulta un valor de 20.774 N que debe ser aplicada en la bancada interior (Figura 3.76).

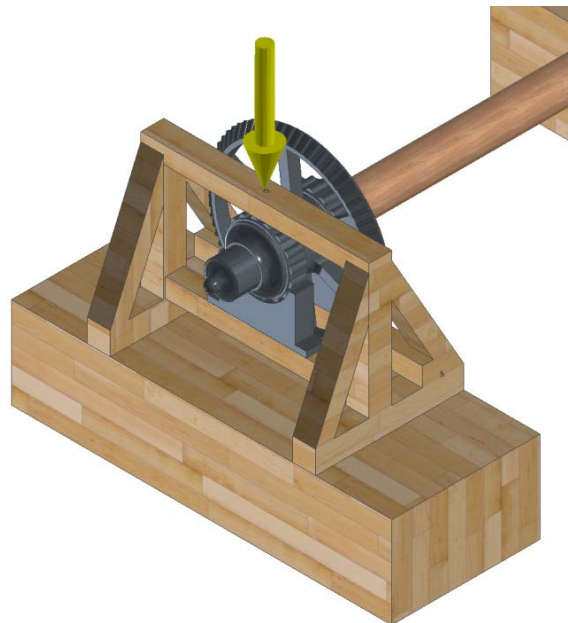


Figura 3.76. Aplicación del peso del árbol vertical de transmisión en el centro de la bancada interior.

Finalmente, una vez aplicadas todas las fuerzas, la simulación queda preparada a expensas de la discretización del dominio computacional a considerar.

3.4.3.5. Discretización o mallado

Antes de comenzar con la simulación, es necesario discretizar el dominio computacional de cálculo. El software genera automáticamente una malla de tetraedros (Figura 3.77), pero no contempla las zonas en las que es previsible que las tensiones sean mayores como en las palas, la unión de éstas con la rueda hidráulica, los ejes de las ruedas, la unión de éstas con el árbol horizontal de transmisión, los puntos de apoyo y los puntos de aplicación de fuerzas.

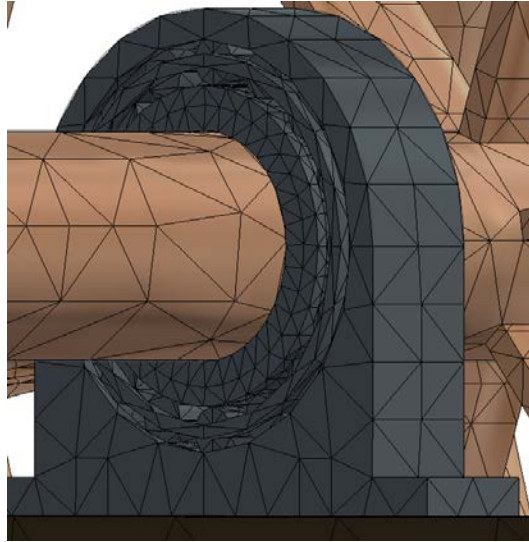


Figura 3.77. Discretización automática proporcionada por el software.

Sin embargo, para obtener resultados precisos, es necesario refinar la malla en zonas de interés. Para ello, se configura la malla con los valores por defecto que ofrece el software, en el que se definen el tamaño medio del elemento de la malla (0,1), su tamaño mínimo (0,2), el factor de modificación (1,5) y ángulo máximo de giro (60°), obteniendo una mayor precisión (Figura 3.78), de cara a obtener resultados fidedignos.

Finalmente, antes de ejecutar la simulación se deben configurar los criterios de convergencia, también con los valores por defecto que ofrece el software, es decir, el número máximo de refinamientos ($h=0$), el criterio de parada (10%) y el umbral de refinado h (0,75).

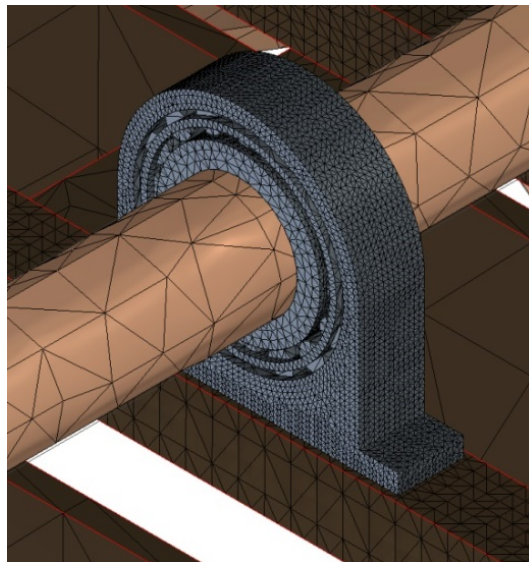


Figura 3.78. Discretización obtenida tras el refinamiento de la malla.

La Figura 3.79 muestra el mallado completo final del mecanismo.

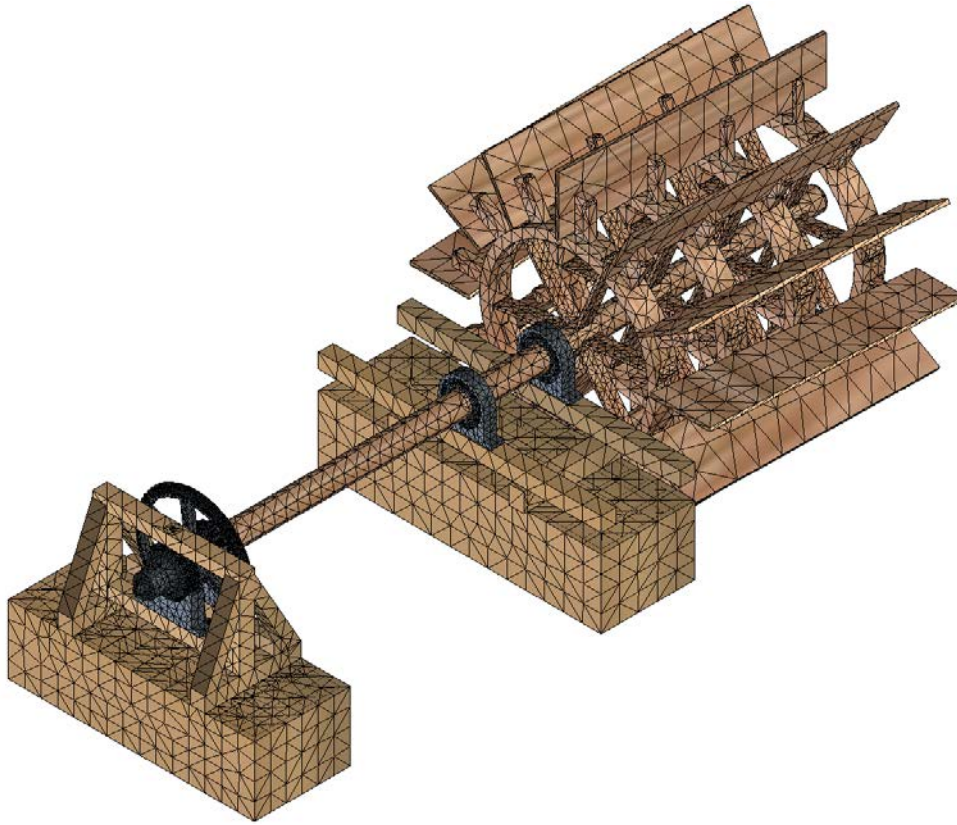


Figura 3.79. Discretización final.

3.4.3.6. Resultados y discusión

Tras ejecutar la simulación, se obtienen todos los resultados que proporciona Autodesk Inventor Professional en el análisis estático, es decir: tensiones de von Mises, desplazamientos, deformaciones y coeficiente de seguridad.

En lo relativo a las tensiones de von Mises, valorando las dos posiciones de funcionamiento anteriormente comentadas, los resultados muestran que el mecanismo está sometido a tensiones bajas (Figura 3.80). Cuando el mecanismo está extendido la tensión con valor más alto (34,79 MPa) se localiza junto al rodamiento que soporta el apoyo de la rueda hidráulica (Figura 3.81). Sin embargo, cuando el mecanismo está agrupado, la tensión más alta (74,96 MPa) se localiza en el rodamiento de la bancada interior (Figura 3.82).

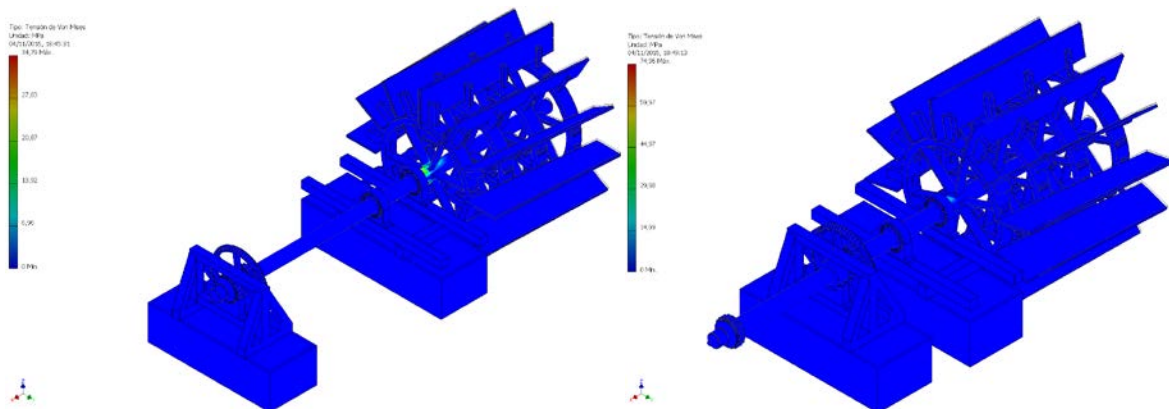


Figura 3.80. Tensiones de von Mises (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado).

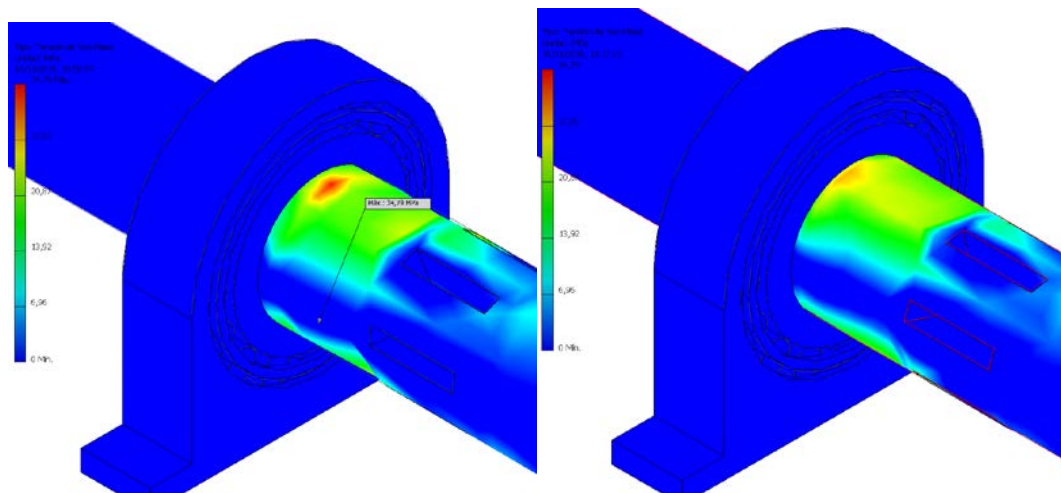


Figura 3.81. Tensiones de von Mises en el apoyo del eje horizontal (Izda.: extendido – Dcha.: agrupado).

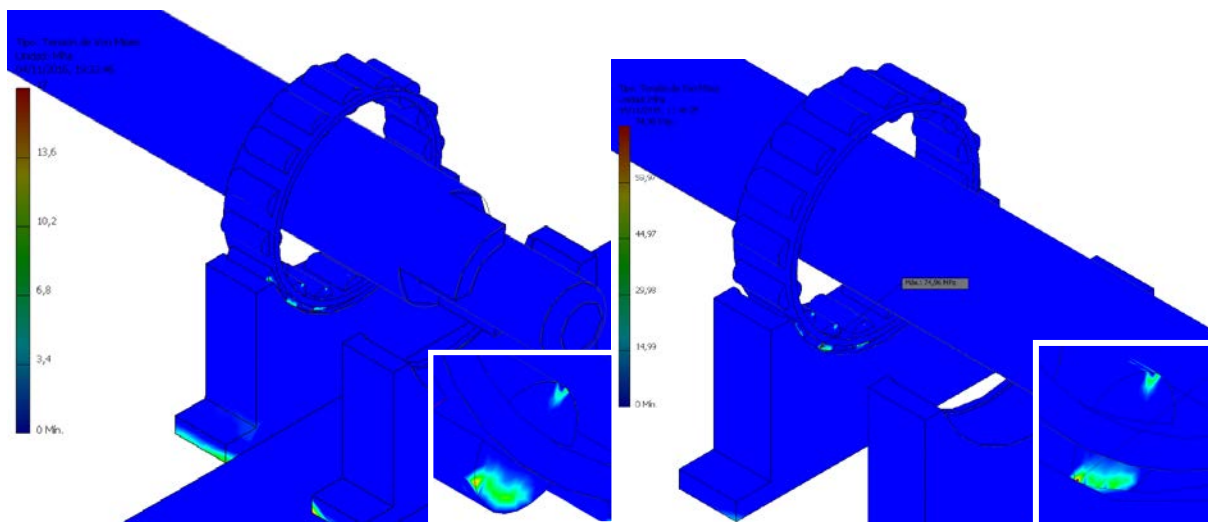


Figura 3.82. Tensiones de von Mises en los rodamientos del soporte (Izda.: extendido – Dcha.: agrupado).

Para conocer si las tensiones que aparecen en estos puntos críticos superan la tensión de rotura del material (madera de roble con un valor de 41 MPa, o hierro fundido con un valor de 758 MPa), se modifica la escala de tensiones de los resultados de forma que Autodesk Inventor Professional adopta la tensión como si fuera de compresión paralela a la veta de la madera, comprobándose que los valores de las tensiones de von Mises ajustados a dicha escala distan mucho de la tensión de rotura (34,79 MPa el punto de máxima tensión en piezas de madera y 74,96 MPa en las de hierro fundido).

Igualmente, la solución obtenida anteriormente se podría comprobar obteniendo el coeficiente de seguridad (Figura 3.83).

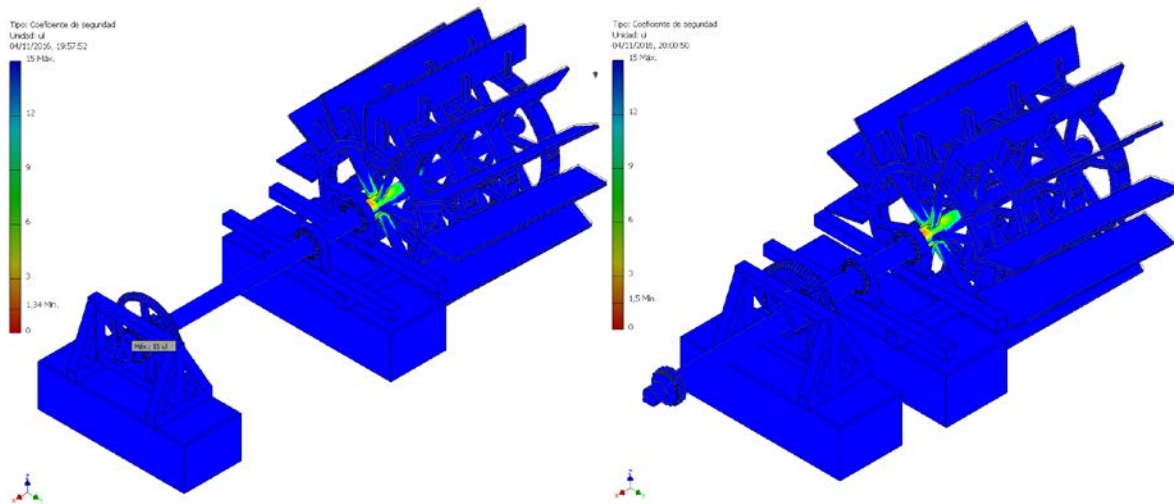


Figura 3.83. Coeficientes de seguridad (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado).

En dicha figura se aprecia cómo dicho coeficiente presenta un valor comprendido entre 1,34 y 15, superior a la unidad, que es el valor mínimo para que no se produzca la rotura del material y, por lo tanto, se está asumiendo que las simplificaciones y la no consideración de algunas cargas y rozamientos son pequeñas frente a este coeficiente. Asimismo, se observa que mientras los elementos metálicos están lejos de llegar a su límite de elasticidad, no ocurre así en el eje horizontal de la rueda que es de madera de roble. Aunque el mecanismo se encuentra bien dimensionado, todo hace indicar que esta pieza de madera debería cambiarse cada cierto tiempo pues las condiciones de humedad afectarían al límite de elasticidad del material.

Finalmente, se han obtenido las deformaciones equivalentes (Figura 3.84) y los desplazamientos (Figura 3.85).

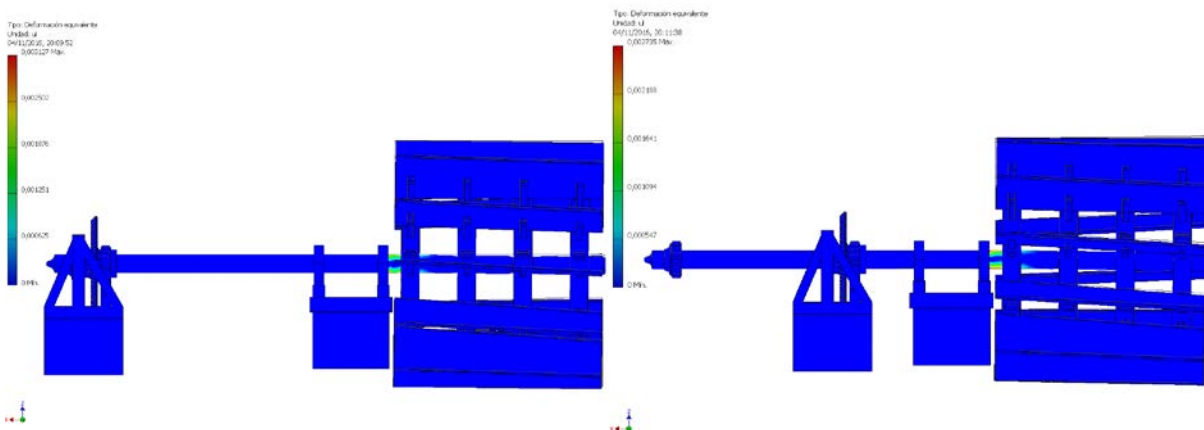


Figura 3.84. Distribución de deformaciones (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado).

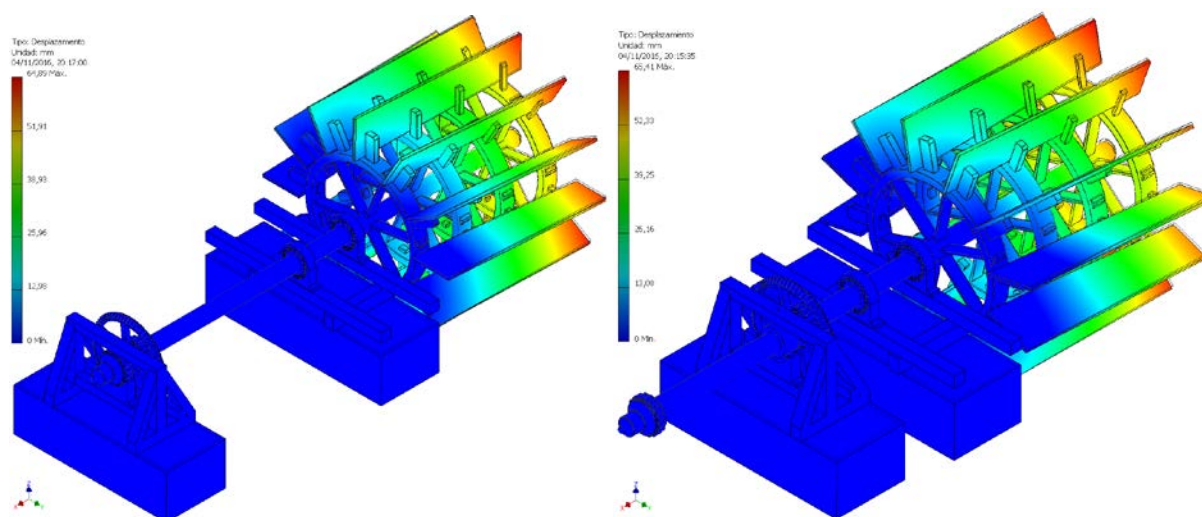


Figura 3.85. Distribución de desplazamientos (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado).

Efectivamente, se puede apreciar cómo las deformaciones equivalentes obtenidas confirman su relación directa con la distribución de tensiones de von Mises, y asimismo, los desplazamientos máximos obtenidos, se encuentran en las palas de la rueda hidráulica, con valores máximos comprendidos entre los 64 y 66 mm que para un material flexible como la madera no suponía ningún problema.

3.4.3.7. Conclusiones

Debido a los altos requerimientos computacionales, ha sido necesario realizar una serie de simplificaciones, tanto funcionales como relativas al proceso de discretización, para disminuir el volumen computacional ya que, aunque no se hubieran realizado dichas simplificaciones, tan sólo se hubiera conseguido aumentar el tiempo de la simulación, pero no mejorar en el resultado obtenido y su discusión.

Finalmente, hay que indicar que efectivamente, las mayores tensiones de von Mises se producen en dos zonas dependiendo de la posición del mecanismo: en la bancada interior, concretamente en los rodamientos que permiten al eje horizontal girar sobre dicha bancada y que actúan como un concentrador de tensiones cuando el mecanismo está agrupado, y en el eje hidráulico en su posición más cercana al primer apoyo, cuando el mecanismo se encuentra extendido. Asimismo, los máximos desplazamientos se producen en las palas de la rueda hidráulica como cabría esperar, pero aun así el mecanismo estaba bien dimensionado, no alcanzando en ningún punto, la tensión de rotura del material.

Por lo tanto, se puede concluir que la construcción de Betancourt, puesta en práctica a finales del siglo XVIII, fue un diseño consistente, original, innovador y dimensionado con un alto factor de seguridad desde el punto de vista estructural, es decir, estaba sobredimensionado, lo que viene a corroborar lo habitual de dichas prácticas en las invenciones de la época.

3.4.4. Impresión 3D

La impresión 3D del molino de sílex requiere un empeño grande. Debido al tamaño que ocupa el edificio que alberga el ingenio, así como el tamaño del eje horizontal de transmisión de la rueda hidráulica, acertar con la escala de la invención es especialmente complejo, ya que la elección de una escala insuficiente lleva consigo la pérdida de detalle de los elementos constructivos, mientras que una escala excesiva puede llevar a tener que imprimir piezas por partes con los inconvenientes que esto conlleva y los gastos derivados del excesivo material empleado.

Sabiendo esto, y gracias a la experiencia adquirida en las anteriores invenciones, se ha decidido adoptar una escala en la que el elemento de mayor longitud y, por lo tanto, el limitante de la escala, sea el eje horizontal de transmisión. La escala elegida ha sido 1:60. Esta decisión ha tenido sus consecuencias de cara a crear los ficheros STL, ya que existían elementos de tamaño mayor a dicho eje, fundamentalmente la fábrica de ladrillo. Por lo tanto, como paso previo necesario para la impresión, ha sido necesario dividir el edificio en varias partes, dos plantas y tejado, y de forma independiente, el sótano y el canal. Cada una de estas partes se ha tratado como un fichero STL que en el montaje volverían a ser ensamblados. Esta decisión ha llevado al ahorro de gran cantidad de material y ha permitido otorgar a la invención una escala óptima.

Respecto al molino propiamente dicho, se ha tratado de individualizar la mayor parte de los elementos, lo que ha permitido definirlos con un nivel de detalle grande, aunque evidentemente, no se ha conseguido con todos los elementos. Especiales dificultades ha habido con los collares de inercia o rodamientos, ya que el tamaño y la gran cantidad de piezas que los componen, no han permitido más que tomarlos como un elemento único, perdiendo la capacidad de rodar. El resto de piezas se han exportado individualmente.

Tras exportar los ficheros STL al software propio de las impresoras que simula las condiciones de impresión, se han ordenado las piezas disponiéndolas en la orientación óptima para que la impresión fuera lo más precisa posible. En este punto se ha decidido qué piezas imprimir a mayor calidad y qué piezas no necesitaban tanta precisión en su acabado. La fábrica de ladrillo, el canal, las ruedas soleras del molino, los bastidores sobre el que se apoya la rueda hidráulica y las palas de la rueda se han impreso con la impresora Airwolf utilizando PLA como material estándar, y el resto de piezas se ha impreso en la impresora Stratasys Objet 30 utilizando resina fotosintética líquida. Las piezas que más trabajo han ocasionado tras su impresión han sido los bastidores debido a la gran cantidad de material soporte que tenían en su interior, el cual ha sido convenientemente eliminado.

El montaje ha sido arduo debido a las dimensiones y a la gran cantidad de piezas que componen el ingenio. En primer lugar, se ha montado la fábrica de ladrillo. Ya se ha comentado que ésta era una sola pieza en el modelo CAD y, por lo tanto, ha sido necesaria ensamblarla para que volviera a su estado original. El siguiente paso ha sido montar la rueda hidráulica. Este proceso es el que más complicación presenta ya que hay que asegurarse de pulir bien los orificios del eje y de los ruidos, pues de otra manera no pueden alojarse los radios y apoyos sobre los que hay que montar las palas. Además, como ya se vio en el modelado, hay que conseguir que las palas tengan cierta inclinación en las dos direcciones de su cara para que faciliten su salida del agua cuando se quiere recoger el eje.

Terminada de montar la rueda sobre el eje hay que insertar los collares en el orden establecido. Así pues, el orden sería el siguiente: primero, los collares que irán en la primera bancada, después el collar de apoyo de la primera bancada, y tras éste, el gran engranaje troncocónico. Tras establecer estos elementos se instalan las bancadas. Sin embargo, las bancadas sobre los que se apoya la rueda hidráulica están flotando sobre el agua. Evidentemente, dado que no se pueden reproducir estas condiciones para el modelo, se han planteado dos soluciones. La primera es elaborar una guía que permita a las bancadas moverse en la dirección del eje horizontal, y la segunda es fijarla respecto al canal. Sin embargo, la desventaja de esta segunda solución, es que el ingenio pierde la facultad de retirarse del curso de agua, por lo que queda permanentemente en posición de trabajo. En la presente impresión, dado que al imprimir los collares estos ya no facilitan la rodadura del eje hidráulico, se ha optado por dejar las bancadas fijas. Probablemente, no haya sido la decisión más acertada, ya que se ha comprobado que, al pulir un poco el eje horizontal, los collares permiten que éste gire, por lo que se podrían haber recreado perfectamente tanto en condiciones de trabajo como en parada. Así pues, tras fijar las bancadas se han pegado los collares en los bastidores, operación delicada, ya que el gran

engranaje troncocónico tiene que estar bien colocado en el bastidor para que engrane con el eje vertical.

Independientemente del ensamblaje del eje horizontal se puede ir ensamblando el eje vertical con el engranaje recto que tiene en la zona superior, insertándolo en su propio rodamiento que va colocado en la solera del segundo piso. El problema es que, hasta que no quedan los bastidores de la rueda hidráulica colocados el extremo inferior del eje, no presenta apoyo y no se conoce a qué altura queda la rueda dentada recta, por lo que el resto del ensamblaje debe esperar a este momento. Montado el bastidor y apoyado el eje vertical, se ensamblan el resto de elementos y los ejes de las piedras volanderas con sus respectivos engranajes.

La única dificultad que podría presentar el montaje real de la invención es que, en condiciones reales de funcionamiento, el canal estuviera con agua y no fuera sencillo fijar la bancada para determinar la altura del eje vertical. Debido a ello, Betancourt planea un eje vertical taladrado a distintas alturas, de modo que el engranaje recto pueda colocarse en distintas posiciones. Además, para que las variaciones de altura debido al aforo del río no desengranen accidentalmente el mecanismo, los engranajes de cada muela están proyectados con un espesor muy superior al del eje vertical.

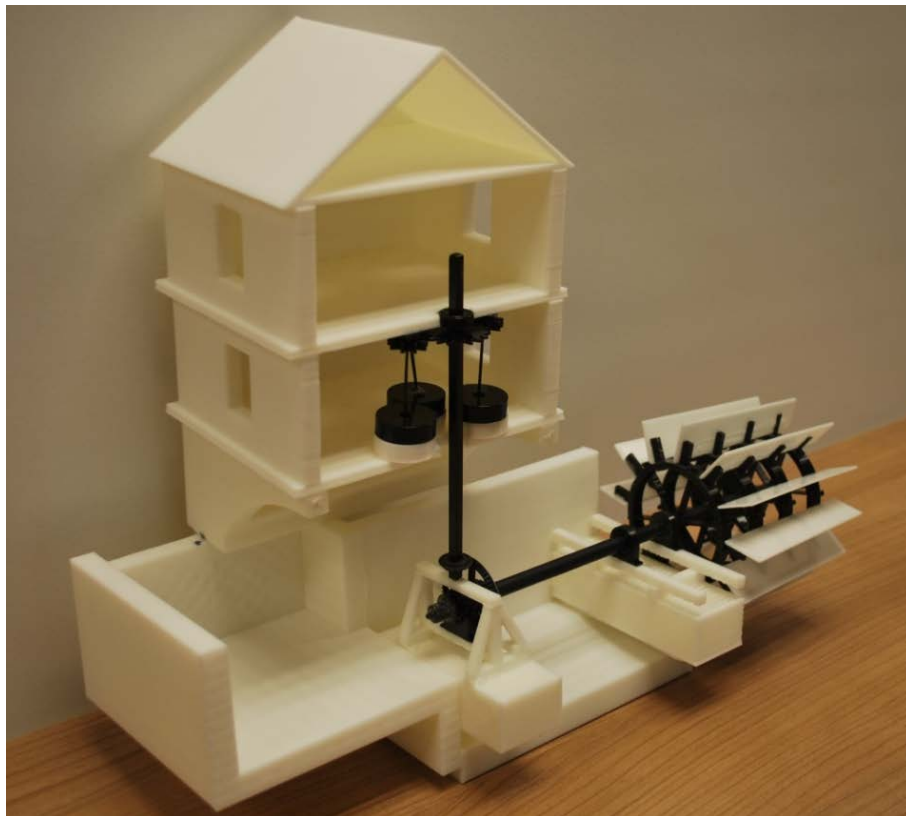


Figura 3.86. Vista general de la impresión 3D.

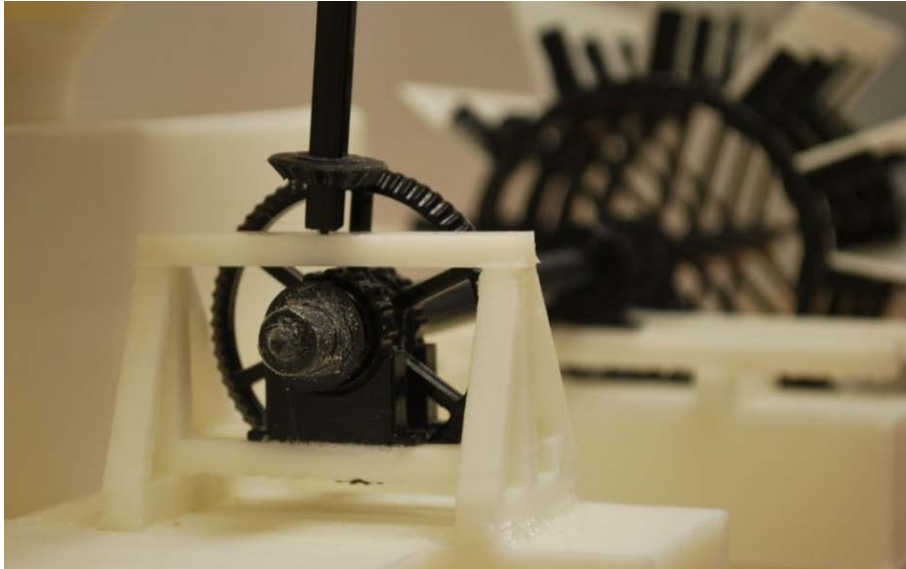


Figura 3.87. Detalle del bastidor fijo y engranajes.

3.5. Esclusa de émbolo buzo

3.5.1. Introducción

Al estudiar los documentos referentes a su esclusa llama la atención la consciencia que el propio autor tiene de la trascendencia de su estudio. Betancourt no titula la memoria en la que presenta su ingenio “esclusa de émbolo buzo” sino “*Mémoire sur un nouveau système de navigation intérieure*” (Betancourt y Molina, 1807). Su propósito es mucho más ambicioso: cambiar el sistema de transportes en canales de toda Europa.

Los años de experiencia en los canales de Castilla (Betancourt y Molina, 1830) y el Imperial de Aragón (Nava Grimón y Betancourt y Molina, 1783) (en 1783, por encargo del secretario de Estado José Moñino, Conde de Floridablanca, Betancourt realizó su primera comisión oficial, consistente en una visita de inspección de las obras y estado del Canal de Aragón, redactando una memoria de carácter técnico, en colaboración con su paisano Alonso de Nava Grimón), le dieron un primer bagaje que posteriormente completaría. En 1784 marchó a la Escuela de Puentes y Caminos de París para realizar estudios de hidráulica y mecánica, entrando en contacto con un grupo brillante de ingenieros con gran experiencia en la construcción de obras hidráulicas. En 1788 viajó a Inglaterra y contempló el plan de canales desarrollado en las Islas, un plan muy distinto del francés. Hasta la fecha, el único canal en uso en Francia era el “canal du Midi”, una imponente obra de ingeniería que conectaba la cuenca atlántica con la mediterránea a través de 241 km. Este canal de 2 m de calado, una anchura de 20m en superficie, y 11 m de profundidad, permitía la navegación de embarcaciones de hasta 80 Tn, siendo la mayor obra de ingeniería del siglo XVI que iba a servir como modelo para el resto de canales de navegación. Sin embargo, el ingeniero español propuso una alternativa mucho más económica y eficaz que este tipo de canales, diseñando un tipo de esclusa completamente novedosa, la esclusa de émbolo buzo.

La novedad del sistema proyectado radicaba en el diseño de canales de muy poca profundidad para embarcaciones de entre 8 y 11 Tn. Esto presentaba una serie de ventajas evidentes: por un lado, los canales eran más sencillos de construir con el consiguiente ahorro de materiales y esfuerzos; por otro, las necesidades hídricas para mantener el caudal del canal eran mucho menores por lo que se podían construir canales junto a cursos de agua menos regulares; y finalmente, el ‘tiro’ de una barcaza de 11 Tn presentaba mucha menos resistencia que el de una barcaza de 80 Tn y, como consecuencia, la velocidad del transporte era mayor. Hay que tener en cuenta, que las naves de la época eran accionadas por motor a sangre (bestias de carga), ayudadas por pequeñas velas si las condiciones eran favorables.

La única desventaja que planteaba este nuevo sistema de navegación, teóricamente más rápido y económico, residía precisamente en las esclusas. De un lado, el paso de las barcasas por las esclusas exigía una gran cantidad de agua que se consumía durante la maniobra de abrir o cerrar las compuertas y, por otro lado, las maniobras para cerrar compuertas, ascender la embarcación, y permitir su paso a través de la esclusa eran lentas, por lo que el tiempo que se ganaba con barcasas pequeñas al recorrer los canales se perdía al tener que repetir dicha maniobra con una mayor frecuencia. En cálculos globales, los canales de poca profundidad para pequeñas barcasas no ahorraban casi tiempo y necesitaban un aporte hidráulico grande en canales de mucho tráfico.

La Academia Francesa de Ciencias acometería bajo la dirección de Louis Becquey (director de obras públicas y canales desde 1817) todo un ambicioso plan de canales, proyecto conocido como proyecto Becquey, que determinó todo el desarrollo de los canales hasta la gran guerra (aproximadamente 3.000 km de nuevos canales). Diez años antes, en 1807, Agustín de Betancourt tuvo la oportunidad de presentar a la Academia Nacional Francesa su memoria sobre los canales de navegación de bajo calado y la solución a los problemas anteriormente descritos:

la esclusa de émbolo buzo. Esta esclusa, idea genuina de Betancourt, tenía la particularidad de no consumir agua durante el ascenso y descenso de las barcazas y presentaba una maniobrabilidad sencilla puesto que se podría encargar a una sola persona. Este ingenio, pieza clave en su nuevo sistema de navegación interior, es el que se va a exponer a continuación, analizándolo en detalle.

La historia posteriormente discurrió por otros derroteros. Becquey conocía perfectamente el sistema de navegación propuesto por el ingeniero español, pero llegó a la conclusión de que podía llegar a una solución intermedia: canales de dimensiones menores a las del canal de Midi pero no tan pequeñas como las propuestas por Betancourt. Los recursos hídricos de la geografía francesa no eran tan limitados como los españoles y cuando los barcos se empezaron a propulsar a motor, las dimensiones de sus canales eran óptimas (Geiger, 1984). Así pues, impuso unas dimensiones mínimas para todos los canales (longitud efectiva 30,4 m; anchura 5,2 m, profundidad en puerto 1,6 m), lo que suponía un máximo de calado de 1,3 m en la embarcación. Las dimensiones de Betancourt eran sensiblemente inferiores, pero mucho más cercanas que las excesivas del canal du Midi (longitud efectiva 6,8 m; anchura 2,1m, y profundidad en puerto de 1,3 m), lo que suponía un calado máximo de 0,9 m.

No existe un estudio precedente desde el punto de vista técnico, sobre el émbolo buzo. Se ha hablado mucho de él, y dentro del catálogo de esclusas aparece como una tipología diferente (Nöel y Carpentier, 1927; Poncelet y Coriolis, 1840). Aunque las ventajas de dicho tipo de esclusa siguen teniendo validez de cara a canalizar regiones con recursos hidráulicos más irregulares, dicho ingenio no se utilizó nunca ya que sólo funcionaba en canales con poca profundidad.

El material de partida ha sido únicamente la información disponible en el Proyecto Agustín de Betancourt de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia promovido por el Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU), el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), el Ministerio de Fomento y la Fundación Juanelo Turriano (Betancourt y Molina, 1807).

En dicha web, se muestra la información relacionada con dicho expediente titulado: *Mémoire sur un nouveau système de navigation intérieure*, datado de agosto de 1807, presentado en la Academia de Ciencias de París, y publicado en 1808. Consta de una memoria de 31 páginas donde expone la solución del problema, así como un informe favorable del Instituto Nacional firmado por Bossut, Monge y Prony de 11 páginas y 4 láminas con teoría, planos y aplicaciones. Toda la información de dicho expediente fue cedida para su digitalización por Archivos Herederos Betancourt Castro.

En la Figura 3.88 se presentan las vistas principales de dicha esclusa sin escala.

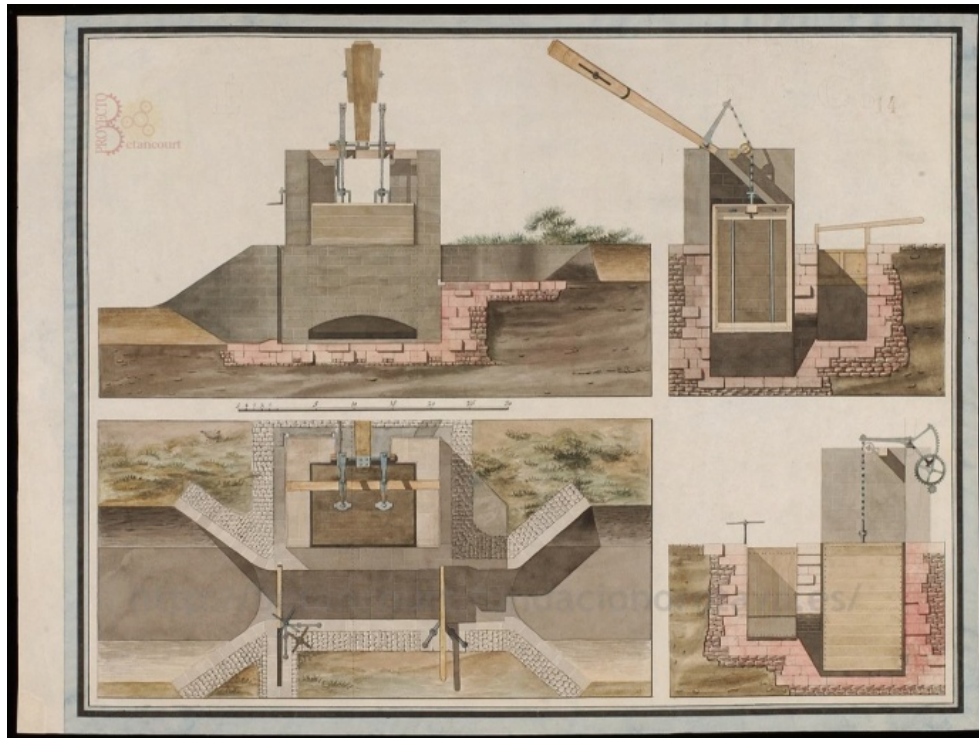


Figura 3.88. Vistas principales de la esclusa de émbolo buzo.
Imagen de la "Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia"

Previamente, Betancourt había escrito "*Dessin de la machine pour faire monter o descendre les bateaux*" en 1796. Se trataba de un diseño de máquina para hacer bajar o subir de un canal inferior a otro superior o viceversa a través de un plano inclinado, ejecutado en el condado de Shropshire de Inglaterra en la orilla del río Severn cerca del puente de hierro de Coalbrookdale a 4 leguas aproximadamente al oeste de Shifnal (Figura 3.89).

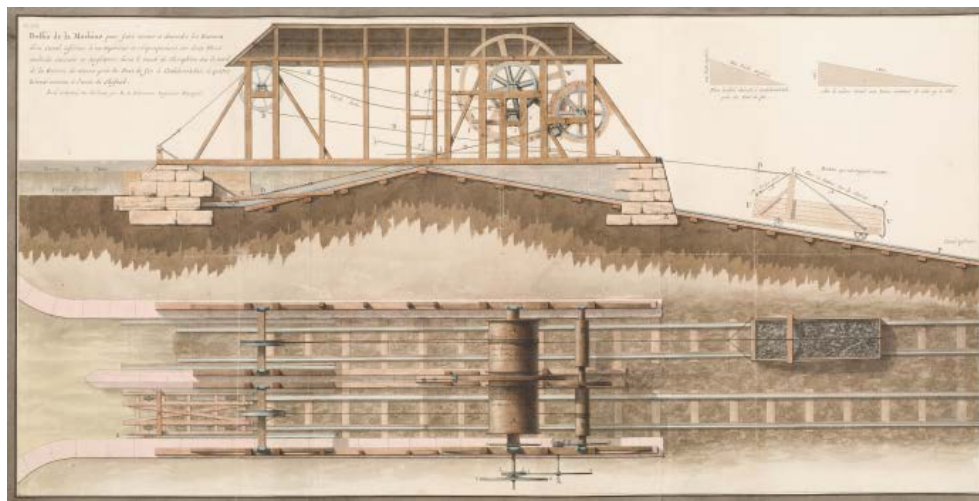


Figura 3.89. Vista de la máquina para subir o bajar barcos de Coalbrookdale.
Imagen de la "Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia"

Toda la información de dicho expediente fue cedida para su digitalización por Escuela Nacional de Puentes y Caminos (Universidad ParisTech). Posteriormente, François de Recicourt lo tradujo al francés en 1799. Sin embargo, la influencia de dicha invención quedó plasmada también en la esclusa de émbolo buzo como muestran las Figuras 3.90 y 3.91, a modo de mejoras, dependiendo de los desniveles existentes.

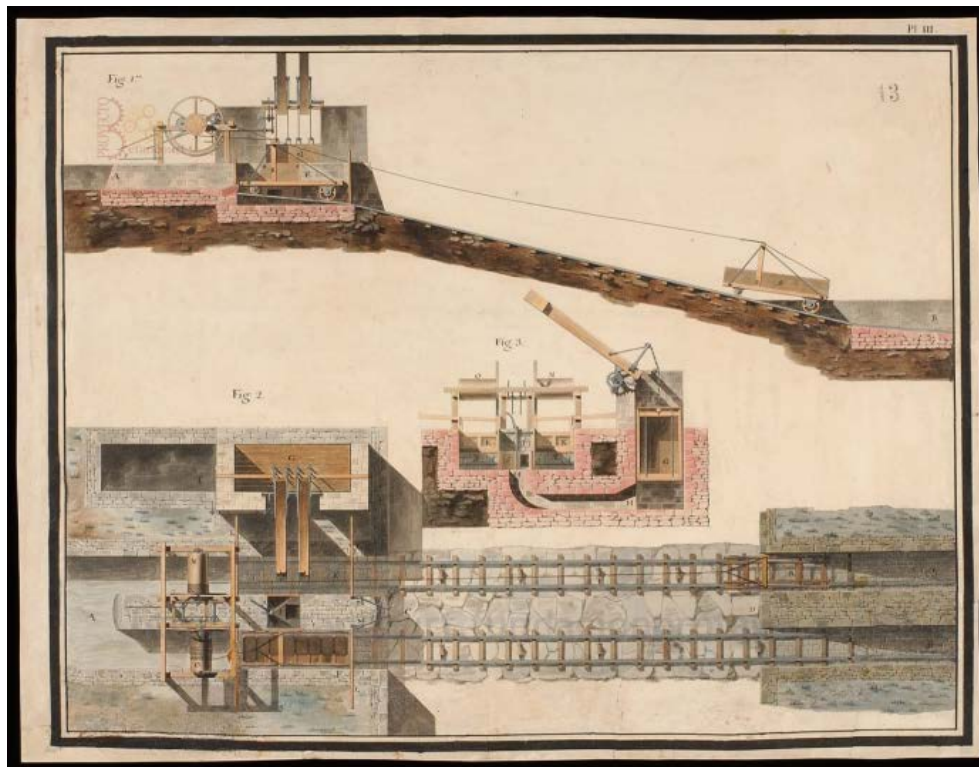


Figura 3.90. Vista de detalle de la misma máquina accionada por el émbolo buzo de Betancourt.
 Imagen de la "Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia".

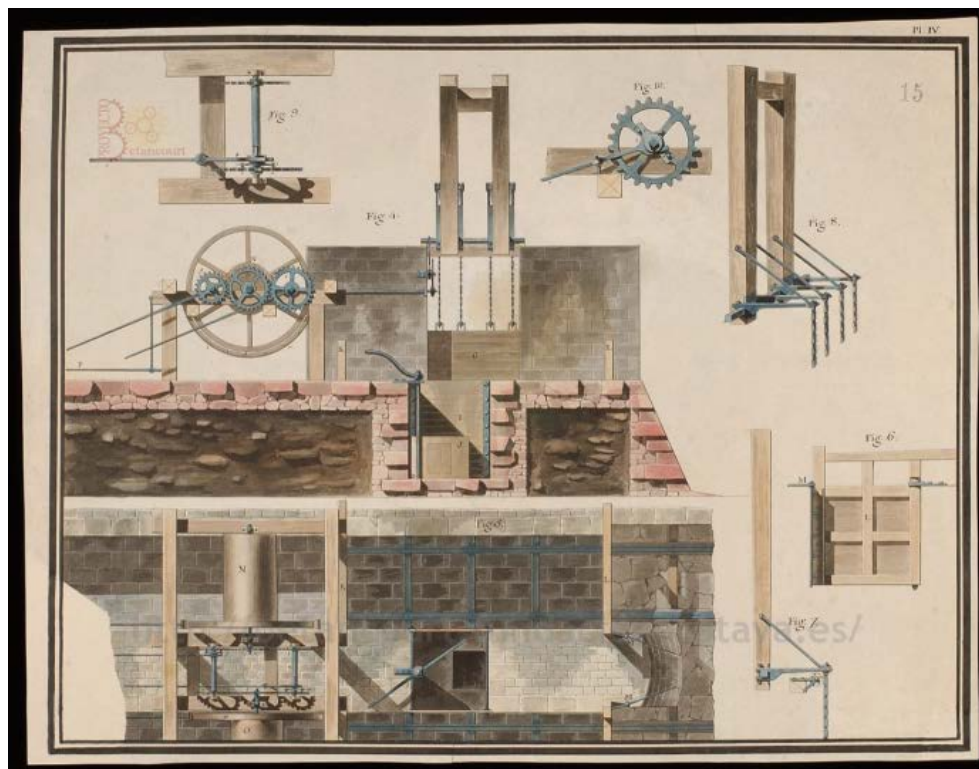


Figura 3.91. Detalles de distintas piezas del mecanismo.
 Imagen de la "Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia"

El modelado tridimensional se ha realizado con el software paramétrico Autodesk Inventor Professional 2016, a partir de la planimetría original y de distintas comprobaciones realizadas sobre la estructura original.

3.5.2. Diseño Asistido por Ordenador

El proceso de modelado tridimensional ha sido bastante complejo por la ausencia de información, tanto gráfica como descriptiva. Las dos únicas láminas de la invención están dibujadas sin escala, y por ello, se ha respetado la proporcionalidad midiendo sobre dichas láminas, para obtener un modelo 3D fidedigno. Por ello, se han adoptado diversas escalas gráficas para que las dimensiones de los elementos del conjunto fueran las mismas en los diferentes planos, y dieran coherencia al mismo, permitiendo posteriormente un modelo consistente.

Examinando con detalle la memoria se puede observar que Betancourt no se detiene a especificar las dimensiones del émbolo buzo. Sin embargo, sí tiene un gran interés en mostrar que teóricamente existe un punto de equilibrio entre dicho émbolo y el contrapeso móvil, independientemente de lo sumergido que esté aquél. Asimismo, no se detiene en concretar el número de dientes que deben tener los engranajes que mueven el contrapeso o el número de ellos; por el contrario, indica que por cada cuarto de vuelta que dé el contrapeso la manivela de maniobra debe girar 16 vueltas. Por todo ello, a la hora de modelizar la esclusa se detallarán las hipótesis dimensionales y geométricas que se han realizado, así como las restricciones de movimiento para que los elementos encajaran perfectamente.

Como se ha indicado anteriormente, el software utilizado ha sido Autodesk Inventor Professional 2016 que permite crear de forma paramétrica los elementos de forma individual (.ipt), así como el ensamblaje de los mismos (.iam) constituyendo el conjunto del molino, e incluyendo las restricciones necesarias tanto de movimiento como de contacto, es decir, limitando los grados de libertad de los mismos.

Seguidamente, y como parte de los resultados obtenidos se muestran diferentes figuras. La Figura 3.92 muestra una perspectiva isométrica la esclusa con su ubicación respecto al canal; la Figura 3.93 una perspectiva estallada o de montaje, donde se indica cómo se posiciona cada elemento para formar los contrapesos y engranajes, y la Figura 3.94 muestra una perspectiva de conjunto con la inclusión de las marcas y su lista, mostrando todos los elementos del mismo.

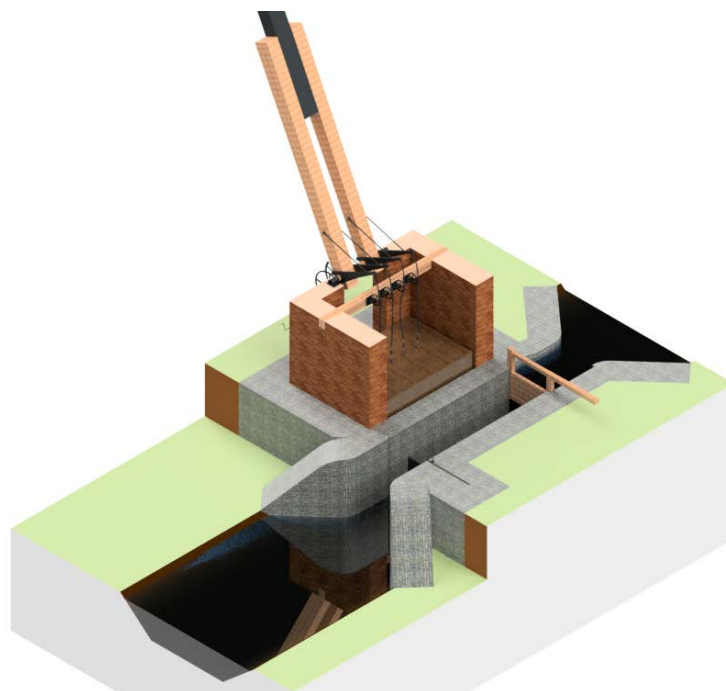


Figura 3.92. Perspectiva isométrica del modelo 3D.



Figura 3.93. Perspectiva estallada del modelo 3D.

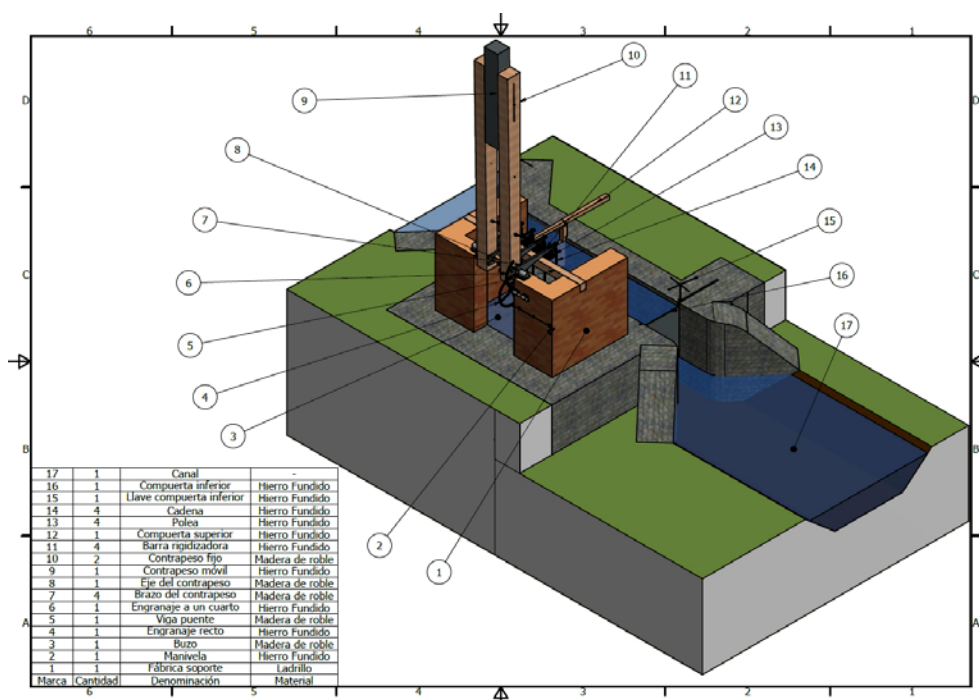


Figura 3.94. Plano de conjunto del modelo 3D.

3.5.2.1. Funcionamiento

Tal y como se observa en la Figura 3.94, la esclusa de émbolo buzo consta fundamentalmente de cuatro partes: por un lado, existe una fábrica de ladrillo sobre la que está diseñado el ingenio con una serie de obras sobre el propio canal; las compuertas del canal (aguas arriba y aguas abajo de la esclusa); el sistema contrapeso que sube y baja el buzo; y el sistema buzo con los elementos que facilitan su movimiento.

Sobre un canal de sección trapezoidal (17) en el que existe un importante desnivel 2,6 m, se sitúa la esclusa. En el frente del “salto” hay que disponer un material resistente al arrastre ya que al reducir la sección del canal y perder altura la energía cinética del fluido puede verse

incrementada. Las paredes del canal en la esclusa son de piedra reforzada. De manera paralela al “estrecho” donde se sitúa el “salto” se dispone la fábrica de ladrillo (1) en cuyo interior se practica un foso con la profundidad suficiente para albergar el buzo (3). Este foso comunica con la parte central del canal a través de una abertura practicada en forma de arcosolio y que permite el libre paso del agua del canal al foso y viceversa.

Aguas arriba de la esclusa la compuerta (12) es de tipo puerta. La compuerta obstaculiza toda la sección del canal y gira sobre su eje, permitiendo el paso del agua de la zona superior a la inferior. La compuerta se abre en dirección contraria al curso del agua, de modo que la propia corriente, ayuda a cerrar el paso. Aguas abajo el mecanismo es más complicado. La compuerta (16) es metálica y se mueve sobre dos ruedas a lo largo de una hendidura transversal al canal y practicada en el fondo. La compuerta se abre y se cierra gracias a la llave (15) que hay en uno de sus extremos. Esta llave no es más que un eje vertical en cuyo extremo hay un engranaje recto que engrana con los dientes que existen en la parte inferior de la puerta. Al rotar el eje la compuerta se mueve transversalmente al canal cerrando el paso del agua.

El sistema de contrapeso es bastante articulado. Para sostener los contrapesos (10) hay un eje móvil (8) que permite el giro del contrapeso por uno de sus extremos. Además de este par de contrapesos existe otro (9) entre ambos, realizado en hierro, el cual tiene libertad de ajustarse a mayor o menor altura para lograr la posición de equilibrio con el buzo. El sistema es bastante pesado, por lo que este eje tiene unas fijaciones especiales en hierro. Los brazos unidos al eje del contrapeso (7) son los encargados de tirar del buzo en cuatro puntos. Para que funcionen correctamente tienen adosados, cada uno de ellos, una barra rigidizadora (11) que refuerzan su estructura.

Para que el sistema se mueva, existe todo un conjunto de engranajes movidos por una manivela (2). Para que con una manivela se pueda mover un mecanismo tan pesado Betancourt proyectó una desmultiplicación de $1/64$. Para lograrlo usa dos engranajes de grandes dimensiones. La manivela tiene un engranaje recto en su extremo con 6 dientes. Sobre éste, engrana otro engranaje recto de 144 dientes (4) el cual está unido solidariamente en su extremo a un pequeño de 6 dientes. Sobre este engranaje pequeño engasta un segundo un engranaje a un cuarto unido solidariamente al eje del contrapeso, el cual tiene 16 dientes (6). Para poder pasar de una posición extrema hasta su contraria es necesario dar 16 vueltas a la manivela.

Por último, el subsistema del buzo está unido al contrapeso mediante cadenas (14). Para que el buzo se mueva verticalmente Betancourt ideó un sistema de poleas (13) de modo que la cadena siempre tira del buzo verticalmente. Sobre el foso que se encuentra en el interior de la fábrica de ladrillo se coloca una viga puente (5) con 4 poleas adosadas. La cadena corre sobre la polea y baja verticalmente hasta el buzo. La unión entre la cadena y el buzo es mediante medias argollas colocadas en el propio buzo. Para facilitar que las cuatro cadenas tengan la misma tensión, el extremo de las cadenas se une a un templador de doble gancho que puede modificar su longitud. Lo novedoso de la esclusa de Betancourt, como más adelante se comentará, fue idear un sistema de esclusa que elevara y descendiera el nivel del agua sin un gasto de agua significativo. Para ello ideó una estructura sumergible, la cual llamó buzo, que desalojaba el agua de una cámara o foso para inundar el canal de esclusa donde se colocaba el transporte. Como se puede apreciar en la (Figura 3.95) cuando el contrapeso está en posición vertical el buzo se sumerge desalojando el agua del foso para inundar el canal de navegación. Cuando el contrapeso está en posición horizontal, por el contrario, buzo asciende y el agua retorna al foso vaciándose el canal de navegación. Estas van a ser las dos posiciones extremas del ingenio sobre las que se realizará el estudio CAE.

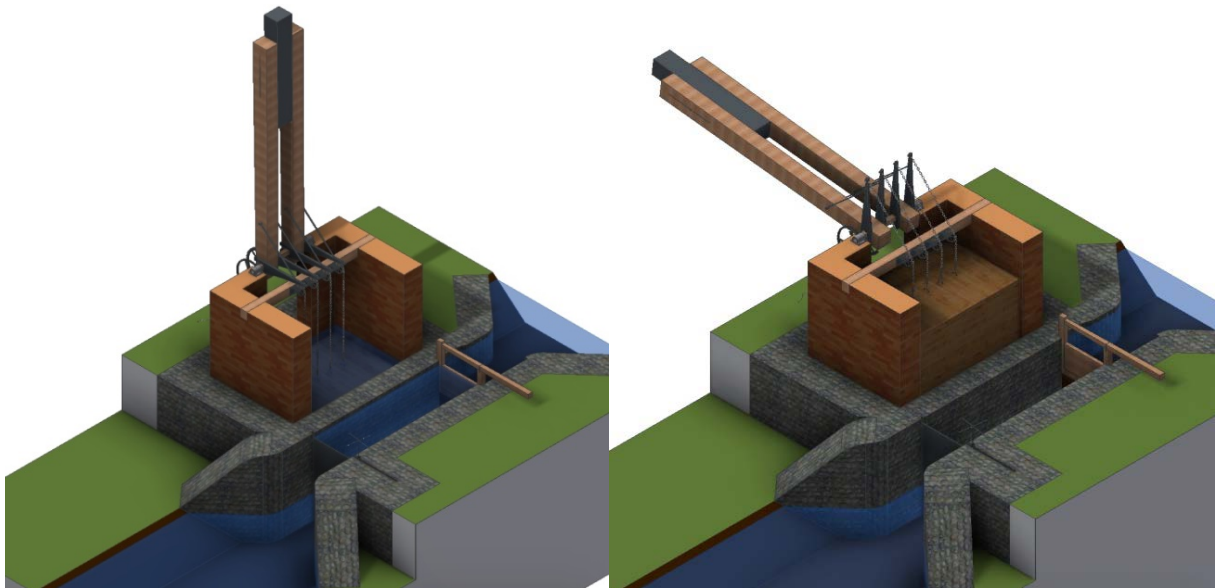


Figura 3.95. Posiciones límite: buzo sumergido (Izda.) y buzo elevado (Dcha.).

3.5.2.2. Modelado del canal y la fábrica de ladrillo

Para la modelización del canal se ha tenido que recurrir a la descripción del mismo que hace Betancourt en su memoria. En concreto, se trata de un canal somero (1,30 m de profundidad) y con un ancho de 8 m en la lámina libre de agua. Este canal es el proyectado por el ingeniero para su red de canales en Francia, un canal para embarcaciones de un máximo de 11 Tn. El desnivel que tiene que salvar la esclusa es de 2,6 m, y el ancho del canal en la esclusa es 2,16 m. Para su modelización se ha dispuesto en primer lugar de un terreno a dos alturas distintas. Sobre el mismo se ha dibujado el canal de sección trapezoidal con las características citadas. La zona del estrechamiento de la esclusa se ha diseñado a continuación. El siguiente paso ha sido delimitar la zona de piedra sobre la que se asienta la fábrica de ladrillo, habiéndose tomado un ancho de 1,26 m de margen alrededor del canal principal como la zona a construir con el material menos erosionable como la piedra. Para facilitar el tránsito desde la zona del canal inferior al superior y viceversa se han diseñado dos rampas con inclinaciones de 37° (Figuras 3.96 y 3.97).

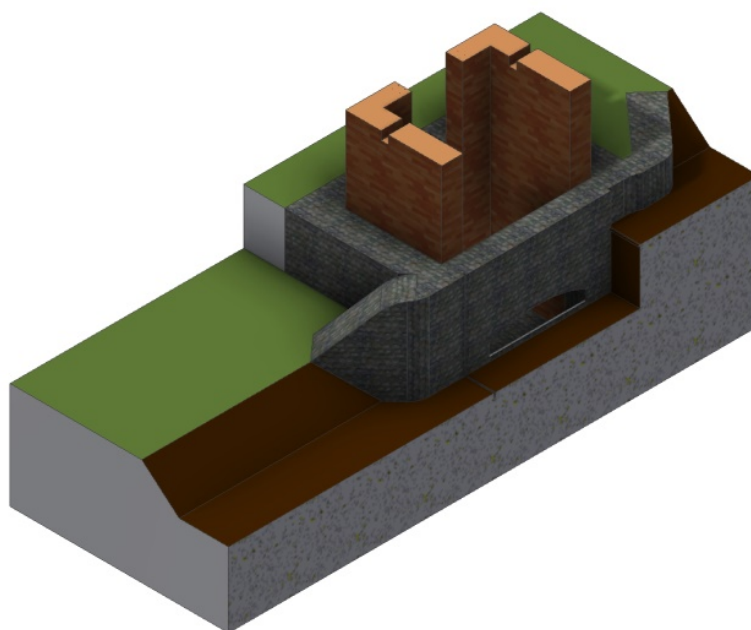


Figura 3.96. Corte longitudinal del canal donde se aprecian detalles de la fábrica de ladrillo.

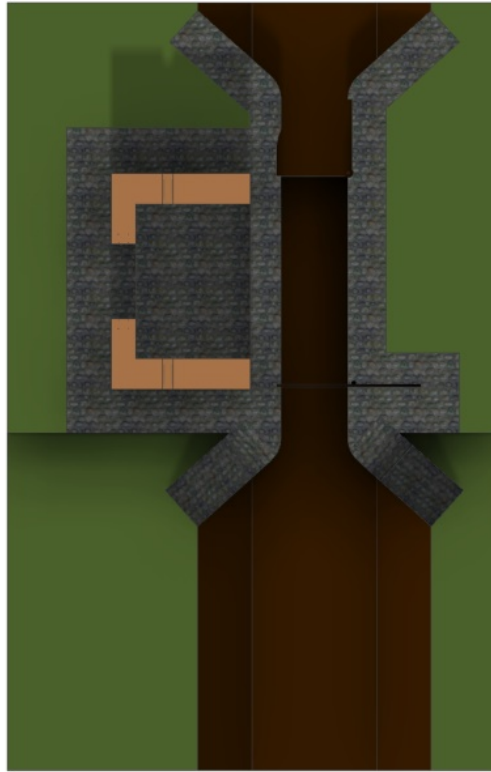


Figura 3.97. Vista en planta del canal y de la fábrica de ladrillo.

Una vez delimitada la zona empedrada se realiza el foso. El foso presenta una profundidad de 5,75 m respecto a la superficie superior, la anchura es de 3,74 m y su longitud de 5,03 m. Entre el fondo del canal y el foso debe haber una abertura para que el agua pueda pasar de un lugar al otro. Dicho paso, en forma de arcosolio, debe estar permanentemente bajo el agua, por lo que su parte superior debe estar a menos de 1,30 m respecto de la superficie del canal (Figura 3.98).

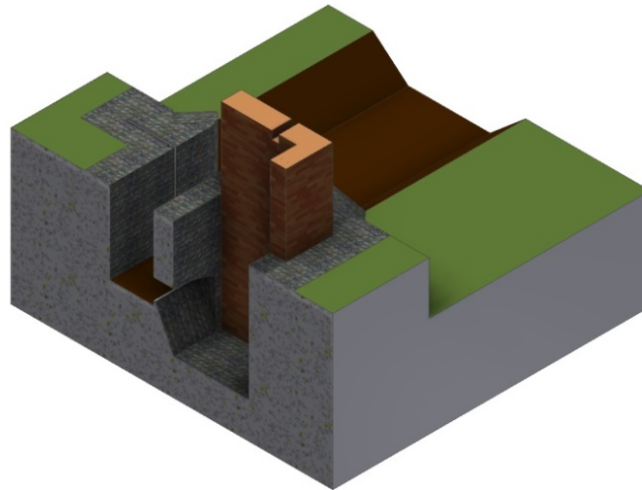


Figura 3.98. Corte transversal de la fábrica de ladrillo donde se aprecia foso, canal y su comunicación.

Terminado el foso, se modeliza el muro de carga que va a soportar toda la maquinaria. Este muro de carga de ladrillo sin armadura, presenta 1 m de espesor y rodea el foso por tres partes. El muro opuesto al canal tiene una abertura que lo divide en dos partes facilitando el movimiento del contrapeso. Si se estima que el ladrillo tiene una resistencia aproximada de entre 6 y 9,5 kg/cm², conocidas las dimensiones del muro (11,170 m²), se deduce que es capaz de soportar cargas mayores a 670 Tn. Por último, hay que determinar la altura del mismo, 4 metros, suficiente para que el buzo esté completamente fuera del agua.

3.5.2.3. Modelado de las compuertas superior e inferior

Las compuertas son determinantes para el correcto funcionamiento de la esclusa, ya que éstas determinan el nivel del agua en el canal. Betancourt proyectó un sistema sencillo y de fácil manejo ya que uno de sus objetivos era que el proceso de ascenso y descenso de embarcaciones llevara el menor tiempo posible.

La compuerta superior presenta un diseño más sencillo que la inferior. Se trata de una compuerta de madera abatible en forma de puerta. Ésta se abate gracias a que en uno de sus extremos existe un eje que facilita esta labor. La puerta, por otro lado, obstruye completamente la sección del canal impidiendo el paso del agua cuando está cerrada, abriendo sólo en dirección contraria a la corriente. Para el correcto dimensionado de la compuerta hay que atender a la altura de la misma. La altura de la compuerta no debe ser superior a 1,30 de modo que, cuando haya un exceso de caudal, la compuerta facilite el alivio (Figura 3.99). Para su apertura y cierre la compuerta tiene un brazo de 2,5 m de longitud, venciendo de este modo, la resistencia que puede ejercer el empuje del agua sobre la puerta. Además, para el perfecto ajuste hay que practicar en el canal los correspondientes agujeros y anclajes (Figura 3.100).



Figura 3.99. Alzado de la compuerta superior.

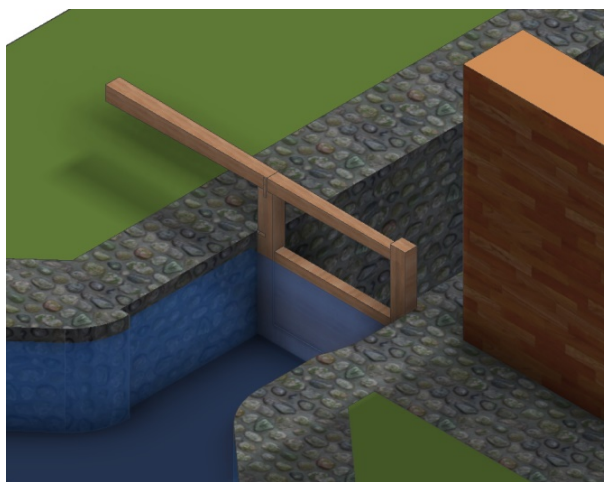


Figura 3.100. Perspectiva axonométrica de la compuerta en su emplazamiento.

La compuerta inferior es bastante más complicada ya que es una compuerta que se abre y cierra con una llave de eje. La compuerta es metálica y funciona desplazándose transversalmente al canal. Para efectuar este desplazamiento, la compuerta tiene en su parte inferior dos ruedas que se ajustan a una guía que hay en el canal, unos centímetros por debajo del fondo, sobre las que se desplaza la compuerta. En la parte interior de la compuerta hay un cordón dentado (41 dientes) desde un extremo de la compuerta al opuesto. Estos dientes engranan con una corona recta de 6 dientes que tiene la llave de eje (Figura 3.101), de manera que para la completa apertura de la compuerta es necesario realizar 7 vueltas a la llave. Para su correcto ajuste también hay que

actuar sobre las paredes del canal, siendo necesario diseñar un lugar tanto para la compuerta una vez abierta como para la llave (Figura 3.102).



Figura 3.101. Perspectiva axonométrica de la compuerta inferior.

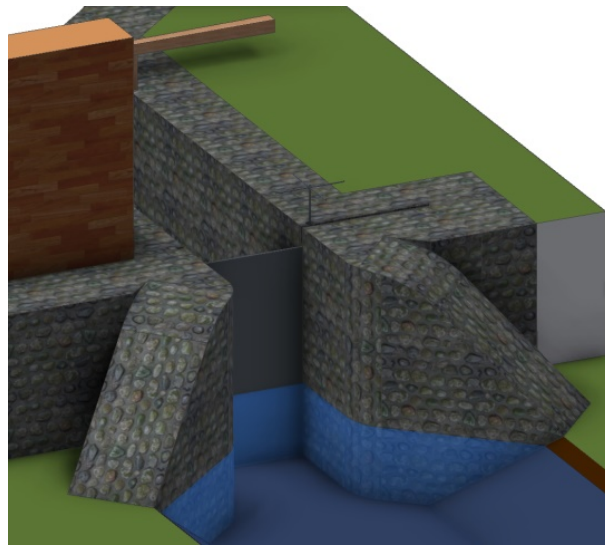


Figura 3.102. Perspectiva axonométrica de la compuerta inferior cerrada.

3.5.2.4. Modelado de los engranajes y la viga puente

Para que el buzo que regula el nivel de agua en el canal funcione correctamente es necesario un enorme contrapeso que haga que el sistema esté en equilibrio, y para mover este contrapeso es necesario un sistema de engranajes que ayude a cambiar de posición. Como en el caso de las compuertas, Betancourt proyectó un sistema de engranajes que reducía el tiempo de trabajo y permitía mover elementos de varias toneladas de peso con mecanismos sencillos.

El sistema de engranajes que movía el contrapeso no aparece de modo detallado ni en sus manuscritos ni en sus láminas. El ingeniero canario sí que señala una serie de pautas a seguir para el correcto diseño de estos engranajes, pero su material y diseño concreto no existe. El principal objetivo de los engranajes es crear un sistema desmultiplicador que reduzca los esfuerzos de maniobra y permita realizar estas operaciones de forma precisa. Las láminas de

Betancourt señalan que el engranaje está compuesto por tres ejes, y que la desmultiplicación deseada es de 1/16. En base a estos datos se ha modelizado el engranaje que se describe a continuación.

La primera pieza del engranaje a modelizar es la manivela. Esta pieza metálica tiene que ser lo suficiente larga para sobresalir a ambos extremos del muro como se aprecia en la Figura 3.103, por lo que se le ha dado una longitud de 2,5 m. En el extremo opuesto a la manivela hay un engranaje recto de 6 dientes. Para fijar esta estructura a la pared se utilizan tres abrazaderas bien atornilladas. Su posición, como se comentará más adelante al hablar del ensamblaje, es determinante para que el mecanismo funcione correctamente.

La segunda pieza, engranada a la manivela es un eje corto, de un diámetro mucho mayor y con dos engranajes dentados. El primero, que engrana con el anterior, es un volante de 48 dientes. Muy cerca de éste, unido solidariamente, hay un engranaje recto de 6 dientes. Esta pieza intermedia soporta tensiones mayores que la manivela y por lo tanto, las abrazaderas y el eje, son de dimensiones superiores a la manivela. Las dos abrazaderas están atornilladas al muro a una distancia adecuada para que los engranajes estén perfectamente acoplados.

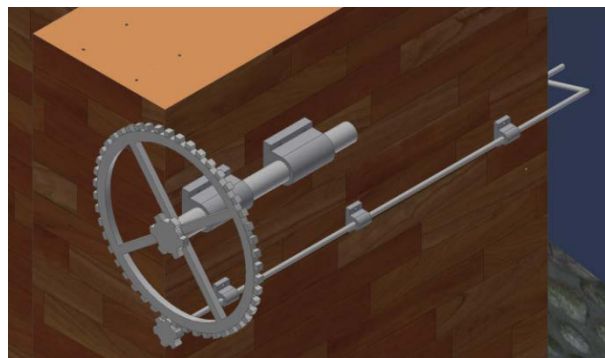


Figura 3.103. Perspectiva axonométrica del sistema de maniobra del contrapeso.

El siguiente paso en la modelización de la maquinaria es la viga puente. Esta viga está suspendida entre las dos partes del muro, cruzando el foso en dirección paralela al canal. La viga es de madera y tiene una sección cuadrada de 0,35 m de lado. La viga mide 7 m de longitud. Sobre la misma hay atornilladas 4 poleas suspendidas por una estructura metálica con forma de escuadra como se aprecia en la Figura 3.104. Las poleas van a servir de apoyo a las cadenas por lo que hay que colocarlas en su lugar una vez se conozcan las dimensiones del contrapeso. Las escuadras de las poleas son dobles, dejando un espacio interior para que se sitúe la polea, y van atornilladas a la viga puente. La polea va montada sobre una pieza cilíndrica que hace de puente entre las dos partes de la escuadra (Figura 3.105). Hoy en día esta pieza estaría soldada y no tendría ningún problema constructivo, pero en la época habría de hacerse con moldes y probablemente se hubiera realizado de otra forma. En cualquier caso, cuando se realice el análisis de tensiones de las piezas se verá que la importancia de las poleas es relativa.

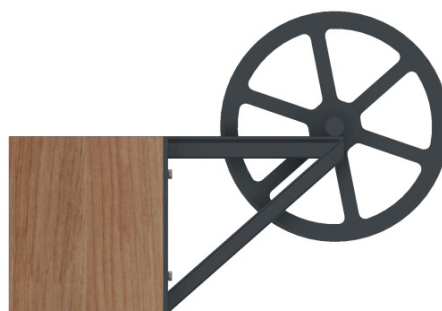


Figura 3.104. Vista lateral de la viga puente con la polea atornillada.



Figura 3.105. Perspectiva axonométrica de la viga puente y las poleas.

Como se puede apreciar en la Figura 3.106, la distancia entre los engranajes y las poleas también tiene importancia ya que sobre las poleas van a descansar los brazos del contrapeso repartiendo así los esfuerzos. La distancia entre la viga puente y la pared del fondo es de 0,87 m, y es determinante para que el conjunto funcione.



Figura 3.106. Vista lateral del sistema de engranajes y la viga puente.

3.5.2.5. Modelado del sistema contrapeso

Una vez terminados de modelar los engranajes y la viga puente, el siguiente es el contrapeso del buzo. Para modelar el contrapeso, es conveniente conocer de antemano el peso del buzo ya que las dimensiones del contrapeso van a variar en función de este dato. De todos modos, al utilizar un software paramétrico, si en un momento posterior hay que cambiar las dimensiones es fácil redimensionar las piezas.

El primer paso es dimensionar el eje del contrapeso. Se trata de una viga de sección cuadrada de 200 mm de lado y una longitud de 2,410 m rematada en sus dos extremos por dos secciones cilíndricas que le facilitan el movimiento rotatorio. La viga está anclada por dos abrazaderas a la parte superior del muro que le permiten girar. La viga tiene el alma de hierro y en uno de sus laterales tiene adherido un engranaje recto a un cuarto de grandes dimensiones. Este engranaje es el que se acopla al engranaje de 6 dientes anteriormente visto. La dimensión del engranaje es de 15 dientes en un cuarto de vuelta, lo equivalente a 60 dientes si se considerara el engranaje completo. La relación entre engranajes es de $6/60$ o lo que es lo mismo $1/10$. Tomando los datos de desmultiplicación del otro par de engranajes se tiene que la relación entre el engranaje del eje de los contrapesos y la manivela es de $1/64$. Si se considera sólo el movimiento de un cuarto de vuelta del eje que soporta el contrapeso tenemos la relación buscada $1/16$ (Figuras 3.107 y 3.108).

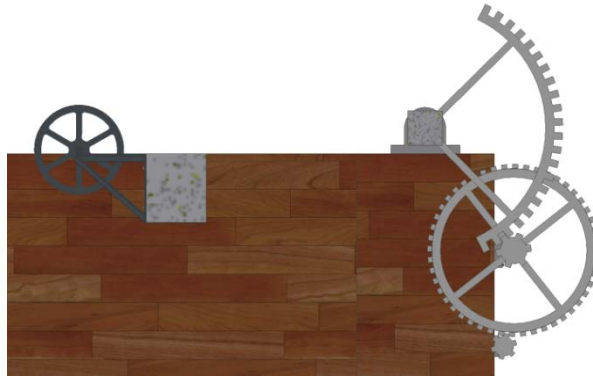


Figura 3.107. Vista lateral del eje del contrapeso con su engranaje a un cuarto.

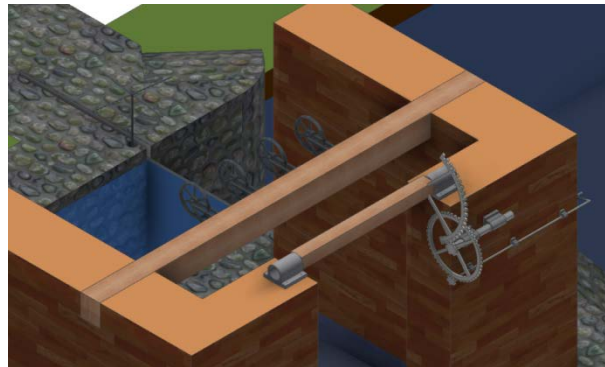


Figura 3.108. Perspectiva axonométrica del eje del contrapeso en su entorno.

Dimensionado el eje con su engranaje y las abrazaderas que lo sostienen, hay que modelar el contrapeso. Los contrapesos son dos vigas de madera de sección variable, 10,80 m de altura y 2.380 kg de masa. En la parte inferior de los mismos hay practicado un taladro de sección cuadrada que lo atraviesa transversalmente para su acople con el eje (Figuras 3.109 y 3.110).

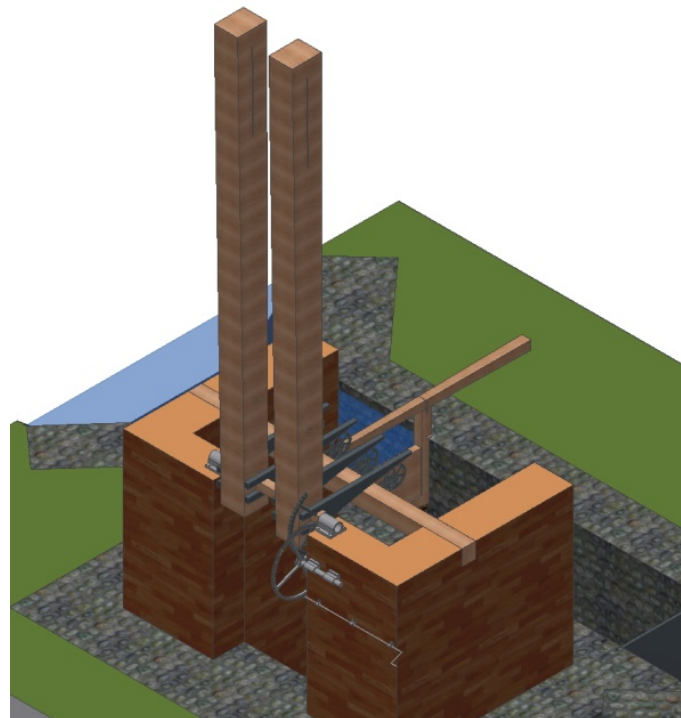


Figura 3.109. Perspectiva axonométrica del sistema contrapeso.

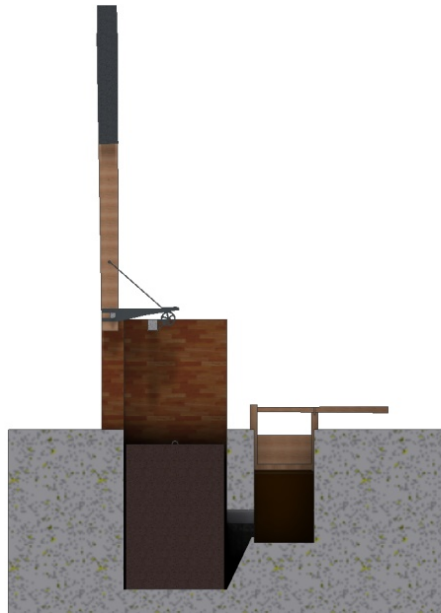


Figura 3.110. Vista lateral del conjunto contrapeso y buzo en su posición sumergida.

Entre los dos enormes contrapesos hay un contrapeso móvil atornillado a los dos contrapesos de madera. Este contrapeso se denomina móvil porque tiene la virtud de poderse ubicar a mayor o menor altura con el fin de lograr establecer el punto de equilibrio con el buzo. Este contrapeso es metálico de sección rectangular, con una masa de 20 Tn y mide 5 m de altura. Los contrapesos de madera tienen una hendidura en su parte media para facilitar colocar el contrapeso a mayor o menor altura. El contrapeso móvil tiene un redondo de hierro de 7,62 cm que lo atraviesa por su centro de gravedad. Los extremos del redondo tienen rosca para que una tuerca de grandes dimensiones fije el contrapeso móvil al par de contrapesos de madera.

En el eje, junto a los contrapesos de madera se sitúan dos brazos, uno a cada lado del contrapeso. Estos brazos metálicos son los que van a sostener la cadena que tira del buzo como se puede apreciar en la Figura 3.111. El brazo está unido al eje gracias a su geometría, pero para evitar un esfuerzo excesivo en la zona de contacto, tiene acoplada una barra rigidizadora que une su parte distal con el contrapeso de madera. Los brazos, como ya se ha dicho, tienen que sostener la cadena que tira del buzo, por lo que además hay que diseñar un dispositivo para que el primer eslabón pueda quedar enganchado a su extremo.

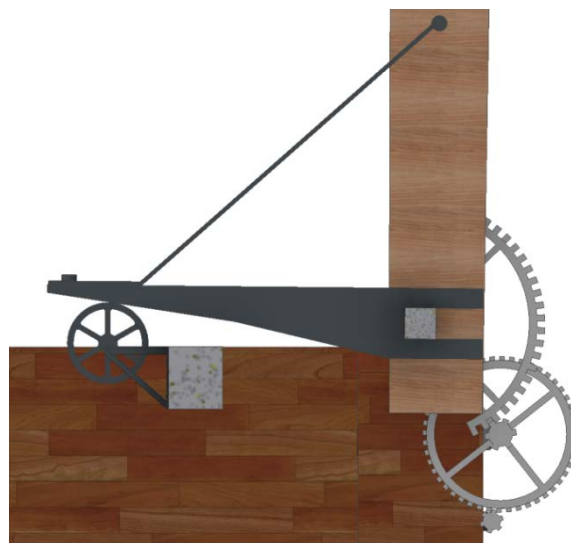


Figura 3.111. Vista lateral de los contrapesos de madera y los brazos metálicos.

3.5.2.6. Modelado del sistema intermedio entre contrapeso y buzo

Como se ha comentado con anterioridad, el modo de conectar el sistema de contrapesos y el buzo es mediante cadenas. La cadena es un elemento que geométricamente ocasiona muchos problemas, tanto de cara a su modelización, como de cara a su análisis estático. Los softwares profesionales no presentan la posibilidad de diseñarlas de una manera estandarizada por lo que se hace necesario representarlas simplificando su geometría (esta simplificación complica muchísimo, los análisis dinámicos y estáticos del ingenio).

Para el modelado de la cadena es necesario seguir un patrón, se sigue la técnica del barrido de un sector circular a lo largo de una curva cerrada. Las dimensiones del eslabón son 20 mm de espesor, 80 mm de longitud y 60 mm de anchura. Después, hay que definir el contacto entre la superficie de los dos eslabones, pues el programa no es capaz de evaluar una geometría tan complicada. Para solucionar este inconveniente se han definido dos puntos del interior de la superficie del eslabón (uno superior y otro inferior), obligando a que cada punto superior de un eslabón sea el opuesto del inferior del siguiente. Esta manera de modelizar no se corresponde con el comportamiento real de dos eslabones, pero se acerca mucho a la realidad, sobre todo de cara a un análisis dinámico. Posteriormente, de cara al análisis estático, esta simplificación del contacto entre superficies hará que las presiones sean mayores de las reales (Figuras 3.112 y 3.113).

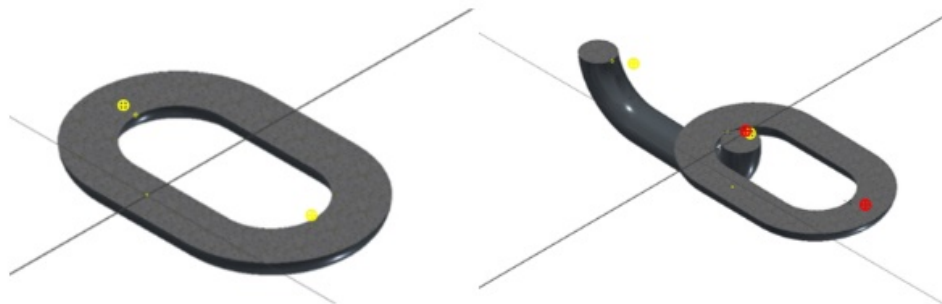


Figura 3.112. Perspectiva axonométrica de un eslabón (Izda.) y definición contactos (Dcha.).

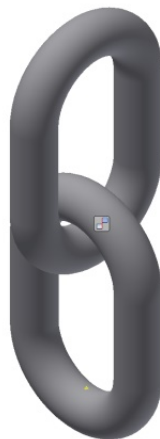


Figura 3.113. Perspectiva axonométrica de dos eslabones.

Para dibujar completamente la cadena de 50 eslabones simplemente hay que repetir la operación girando 180° un eslabón respecto al otro, manteniendo siempre el contacto (Figura 3.114). El software permite copiar la cadena completa una vez terminada por lo que no es necesario repetir el proceso cuatro veces.

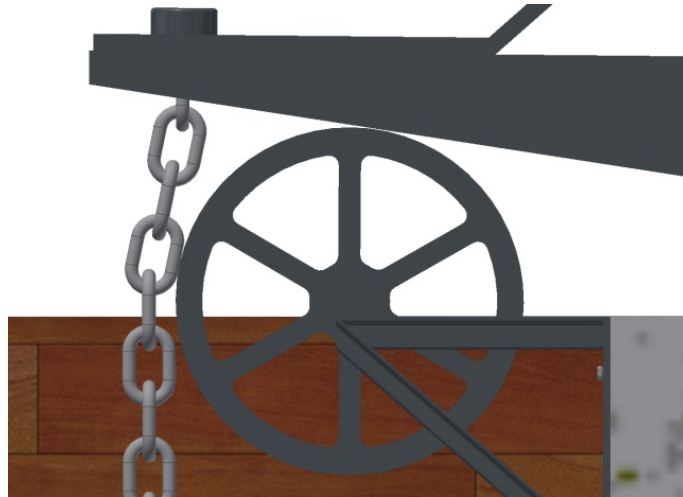


Figura 3.114. Vista lateral de la cadena sobre la polea.

Para que las cuatro cadenas tiren a la vez del buzo, evitando así que una esté más cargada que otra, en el modelo se utilizan templadores de doble gancho. Esta pieza está situada al final de la cadena y, cuando se gira, la distancia de los ganchos que hay en sus extremos se reduce o aumenta. El templador tiene una de las dos roscas dibujada en sentido contrario, de modo que, los ganchos que en sus extremos también tienen rosca, se acercan cuando se gira el templador en sentido dextrógiro y se alejan cuando el sentido es levógiro. El gancho superior está conectado a la cadena mientras que el inferior lo hace a las argollas del buzo (Figura 3.115).



Figura 3.115. Perspectiva axonométrica del templador de doble gancho.

3.5.2.7. Modelado del buzo

El buzo es una estructura de madera en forma de prisma de 4,873 m de longitud, 3,573 m de anchura y 5,279 m de altura. Esta estructura, como ya se ha comentado, tiene unas argollas en su parte superior para poderse enganchar a las cadenas. Su interior está vacío, pero tiene en el fondo una abertura de rosca. La finalidad de esta abertura es llenar el buzo de agua, y una vez lleno cerrar la abertura. Cuando el buzo está lleno de agua, es decir, operativo, el peso del mismo es 91.916 kg (Figuras 3.116 a 3.118).

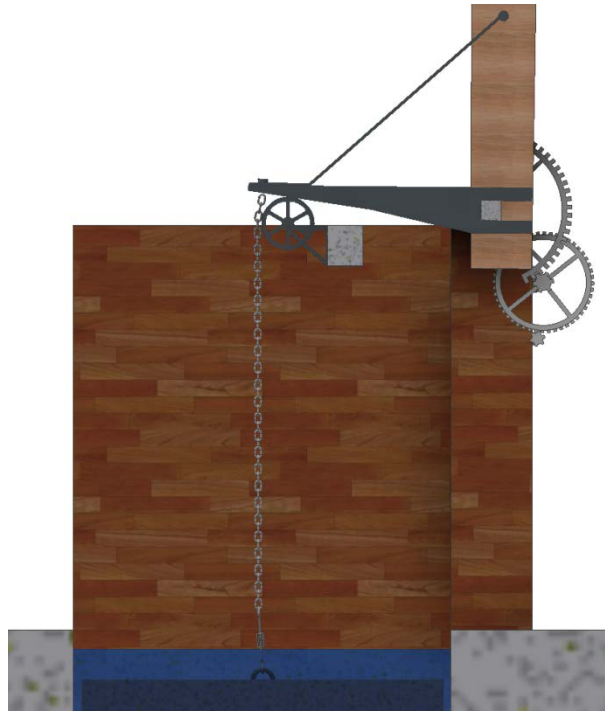


Figura 3.116. Vista lateral del sistema de conexión entre contrapeso y buzo.

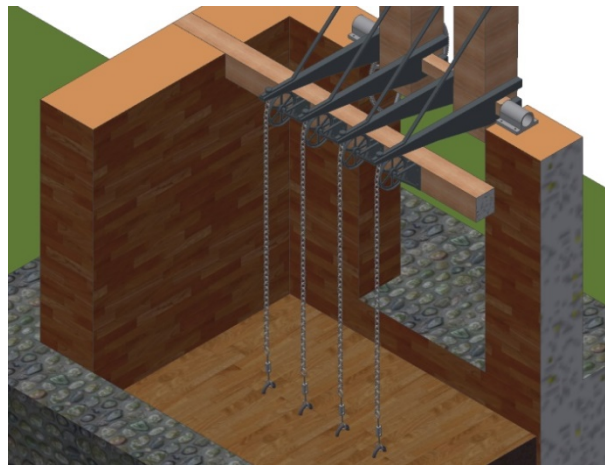


Figura 3.117. Perspectiva axonométrica seccionada de la conexión entre contrapeso y buzo.

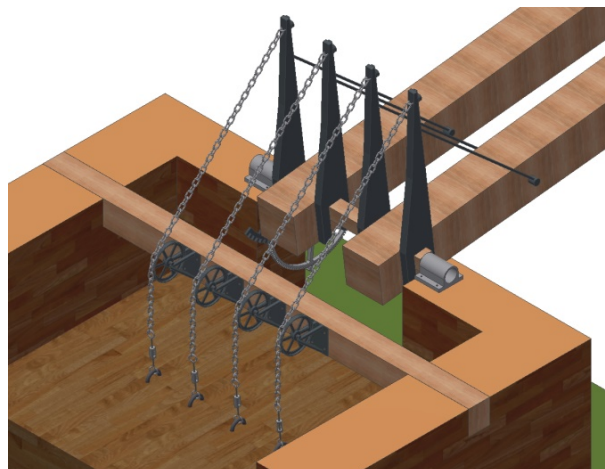


Figura 3.118. Perspectiva axonométrica de la cadena en su posición levantada.

3.5.2.8. Ensamblaje final

El ensamblaje final es determinante para que el conjunto del mecanismo funcione correctamente y posteriormente pueda utilizarse para la simulación de los movimientos o para el análisis estructural. Para lograr este objetivo es imprescindible guardar el orden lógico del ensamblaje.

En primer lugar, hay que situar el canal con la fábrica de ladrillo. Una vez situada esta parte hay que fijarla con el fin de que el resto de operaciones no modifique su geometría. En segundo lugar, hay que ensamblar las compuertas. La compuerta superior tiene un eje sobre el que gira. Por ello, a este eje hay que aplicarle una restricción de inserción sobre el agujero que hay practicado en el canal con este fin. Además, para que funcione correctamente en el canal, hay que activar los contactos con los elementos del terreno, pues de ese modo la geometría del canal impide que se mueva más allá de sus posiciones extremas.

La compuerta inferior es algo más complicada de ensamblar debido a la llave de eje que la controla. Antes de ensamblarla, hay que ensamblar la llave de eje restringiéndola por inserción en su agujero. Hay que comprobar que el engranaje queda a la altura correcta para que entre en contacto posteriormente con el cordón engranado de la compuerta. Después se insertan las ruedas en la parte inferior de la compuerta donde están los ejes de las mismas. Además, hay que restringir su movimiento por coincidencia con las paredes interiores de la guía; de este modo, ambas ruedas permiten moverse a la compuerta transversalmente. Una vez colocadas las ruedas hay que restringir el movimiento de la propia compuerta. Para ello, hay que colocar la compuerta con el cordón de engranaje mirando hacia la compuerta superior, y además, se restringe por coincidencia el movimiento de la hoja externa con la pared del resguardo. Por último, se restringe mediante una restricción rotación-traslación el cordón engranado con el engranaje recto del eje, y para ello, hay que determinar cuánto se mueve la compuerta por cada vuelta de eje que se da, resultando un valor de 0,360 m.

Terminado el ensamblaje de las compuertas hay que ensamblar el sistema buzo de la esclusa. En primer lugar, se ensamblará el sistema de engranajes. Para su correcta disposición es importante colocar en su sitio las abrazaderas de los ejes. Las abrazaderas se colocan restringiendo todos sus movimientos con restricciones de contacto con la pared de ladrillo y nivelándolos respecto a los bordes de la misma. Una vez colocadas las abrazaderas se insertan los ejes en las mismas nivelándolos respecto a alguno de sus extremos, siendo importante que los engranajes queden situados a la misma altura. Terminada esta operación tan sólo queda por restringir la rotación de un engranaje respecto al otro conociendo la relación que tienen entre dientes. Por cada vuelta de manivela el engranaje dará $1/8$ de vuelta. Una vez que se comprueba que los engranajes se acoplan correctamente se procede a atornillar las abrazaderas a la fábrica de ladrillo. Autodesk Inventor Professional facilita esta operación a través de conectores de perno atornillados. En función del diámetro del agujero de la abrazadera se elige el tornillo apropiado para la operación de entre los que ofrece la propia biblioteca de Autodesk.

Toca ahora ensamblar la viga puente con las poleas. La viga se ensambla con restricciones de contacto que impidan todo movimiento. Se nivela hasta el borde ya que la geometría de la fábrica está hecha a la medida de sus dimensiones. Sobre la superficie correspondiente de la viga hay que fijar el soporte en escuadra de la polea, diseñado como una pieza única (ya que no existían soldaduras en la época). El soporte se ensambla restringiendo sus movimientos por contacto y dando las distancias pertinentes para que queden correctamente niveladas y equidistantes. Una vez en su sitio se atornillan a la viga puente como se ha hecho con anterioridad con las abrazaderas. Fijado el soporte, la polea se ensambla restringiendo su agujero por inserción con el eje del soporte, pues de este modo, rotan libremente sobre dicho eje. Asimismo, para que no se desplacen a lo largo del eje, hay que nivelarlo respecto a uno de los extremos dando la distancia pertinente.

El ensamblaje del contrapeso es la siguiente tarea y es algo más complicada. En primer lugar, como en el caso del sistema de engranajes, se instalan las abrazaderas del eje del contrapeso, cuyas dimensiones son mayores que las anteriores, y necesariamente, los tornillos para su perfecto ajuste son mayores. Colocadas las abrazaderas se inserta en su seno el eje del contrapeso. Se restringe el mismo por inserción y se nivela para evitar el movimiento longitudinal. Una vez hecho esto, hay que cerciorarse de que el engranaje del eje del contrapeso coincida con el del eje desmultiplicador. En el caso de que no haya que ajustarlo se puede proceder a restringir el movimiento de rotación de uno respecto al otro, y para ello, se define que por cada vuelta que da el engranaje del eje desmultiplicador el eje a un cuarto da $1/10$ de vuelta.

Una vez que está perfectamente ensamblado el eje del contrapeso hay que ensamblar los propios contrapesos. Para ello, la geometría del eje ajusta perfectamente con los dos contrapesos de madera. Se definen dos restricciones de contacto con respecto al taladro cuadrado de los contrapesos y se nivela con respecto al extremo del eje para que queden fijos a la distancia requerida. De este modo, los contrapesos están solidariamente unidos al eje. El siguiente paso es ensamblar los brazos del contrapeso de los cuales va a pender la cadena. Estos brazos van ajustados a ambos lados del contrapeso de madera y colocados sobre el eje del contrapeso. Por ello, hay que restringir su movimiento primero mediante contacto respecto al contrapeso y después con dos más respecto al eje, así queda también solidariamente unido al eje. Sobre cada brazo, existen cuatro, y hay que colocar el elemento rigidizador. Éste también debe ir fijo y se restringe también por contacto con el brazo y el contrapeso de madera, nivelándolo para que quede centrado respecto al brazo.

Terminada esta parte queda pendiente instalar el contrapeso móvil en su posición. En principio es necesario localizar el punto de equilibrio para poder situar en su lugar este contrapeso. El diseño del contrapeso de madera permite cambiar la posición del mismo para su correcto ajuste. En el modelo CAD no es necesario calcular su posición, pero sí será necesario hacerlo para que las tensiones y ajustes del CAE sean las correctas y el mecanismo funcione correctamente.

Establecido el punto en el que se quiere poner el contrapeso móvil, se define una restricción por contacto tangente entre el eje del contrapeso móvil y la pared del ojal del contrapeso de madera. Además, se define una restricción de contacto entre la pared del contrapeso móvil con la de madera, y una última de nivel entre los extremos de ambos contrapesos de modo que quede fijada a la altura deseada. Este contrapeso se va a comportar de modo solidario al contrapeso de madera. Aunque técnicamente se ha modelizado el comportamiento de los contrapesos, es necesario fijar el contrapeso con un par de tuercas de dimensiones suficientes para sostener el contrapeso en su lugar. Para finalizar el ensamblaje del contrapeso, hay que ensamblar dos argollas a los brazos del contrapeso. Estas argollas son el arranque de la cadena que a continuación hay que ensamblar.

Como se ha dicho con anterioridad, la cadena es el elemento más complicado de modelizar de todo el ingenio de Agustín de Betancourt. Los requisitos computacionales para la correcta modelización de una cadena son excesivos para cualquier procesador medio-alto. Por ello, es preferible ensamblar la cadena previamente e introducirla ensamblada en el propio modelo con la forma correspondiente. De otro modo, el tiempo que se va a emplear en el análisis estático es excesivo y los resultados insatisfactorios.

Las cadenas importadas se ensamblan por la restricción de contacto entre la argolla superior que pende del brazo y el primer eslabón. Esta restricción permite cierto movimiento a la cadena, aunque actúe de manera rígida. Además, hay que definir el contacto, por contacto entre los eslabones que están pegados a la polea. El extremo opuesto se ensambla del mismo modo la polea con el gancho del templador. Esta operación hay que realizarla cuatro veces, una por brazo.

El último elemento a ensamblar es el buzo. En primer lugar, se define un grado de libertad restringiendo el movimiento por contacto entre las paredes de la fábrica de ladrillo y las paredes del buzo. Esta restricción se hace por nivel ya que hay cierto margen entre unas y otras por donde se desplaza con libertad el agua. En segundo lugar, se restringen por contacto las argollas del buzo con el gancho inferior del templador. Esta restricción, permite al buzo moverse cuando lo hacen las cadenas en su movimiento ascendente o descendente.

3.5.3. Ingeniería Asistida por Ordenador

3.5.3.1. Preprocesado

Para la simulación mediante ingeniería asistida por ordenador, la primera etapa consiste en la preparación y simplificación del modelo para facilitar la ejecución del análisis (Figura 3.119). La finalidad de este paso previo es establecer unas condiciones de cálculo que sean asumibles para el ordenador sin comprometer los resultados del análisis. Por otro lado, de la multitud de posiciones que se podrían analizar se escogen las 2 extremas, de modo que se analice la invención en las condiciones más desfavorables.

- En primer lugar, se ha eliminado el terreno, las compuertas superior e inferior, la fábrica de ladrillo que sirve de soporte al mecanismo y el agua del canal. De este modo, se presentan sólo los elementos propiamente estructurales. La fábrica de ladrillo de la esclusa es un muro maestro de más de un metro de anchura que por sus características puede soportar esfuerzos muy superiores a los que está sometido.
- Para el cálculo de estructuras, el agua tiene unas propiedades físicas que escapan al análisis. Así pues, el émbolo buzo es una estructura de madera en cuyo interior hay contenidos varios metros cúbicos de agua. Este elemento, que escapa al análisis estructural, deberá ser sustituido por una carga sobre el fondo de la caja que simule su peso.
- Al eliminar el muro de contención sobre el que se sitúa la estructura a estudiar, es imprescindible que los elementos que están atornillados y apoyados en el muro lo sigan estando. Por tanto, las superficies en contacto con el muro habrá que definir las como apoyos fijos o empotramientos, dependiendo de la relación que tengan con el muro.
- Por último, cuando el émbolo buzo está sumergido en el foso no ejerce ninguna carga sobre las cadenas. Así pues, se ha optado por eliminarlo del análisis ya que distrae la atención de la estructura que es la que realmente está sufriendo las solicitaciones, no influyendo en los resultados.

Por último, cabe señalar que no se ha añadido ninguna carga debido al propio operario de la máquina, ya que éste ejerce fuerza sobre la manivela para alzar o bajar los contrapesos. El sistema está en una posición de equilibrio constante, como el propio Betancourt indica en su memoria, por lo que la maniobrabilidad del mismo exige fuerzas pequeñas, despreciables frente a las decenas de toneladas que pesan tanto los contrapesos como el propio émbolo buzo. Por lo tanto, incluir momentos de inercia en la manivela, lo que afectaría a los ejes, no se traduce en solicitaciones apreciables frente a las que producen las propias cargas del sistema, pero sí complicaría notablemente el análisis.

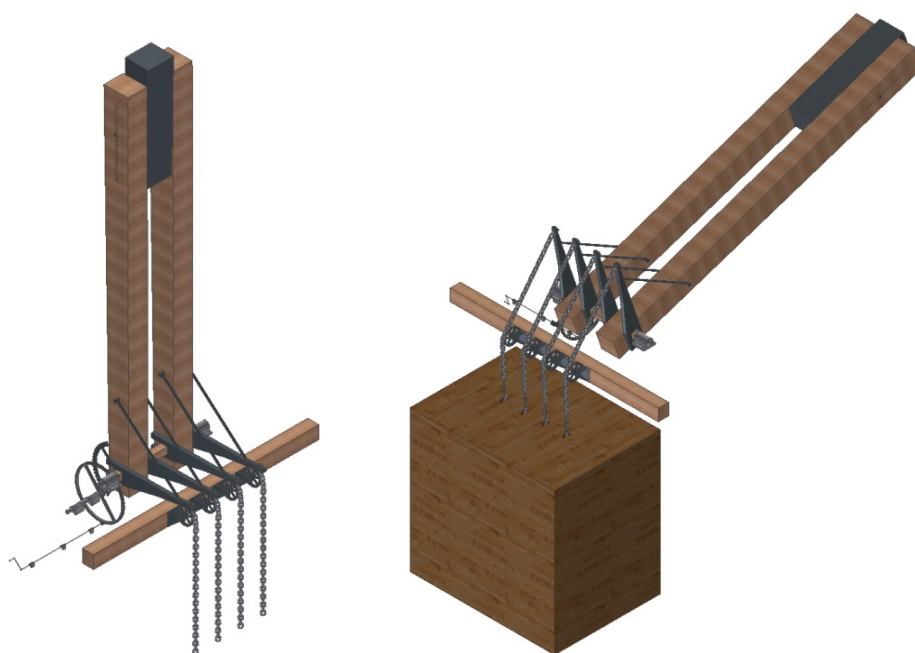


Figura 3.119. Posición centrada (Izda.) y posición engranada (Dcha.).

3.5.3.2. Asignación de materiales

La siguiente etapa consiste en asignar un material a cada elemento que compone el ensamblaje. Sin embargo, en los documentos originales de la esclusa los materiales no están definidos. Las láminas muestran que el ingenio tiene partes de madera y partes metálicas, pero no especifica los tipos. Además, se conoce que la esclusa no se llegó nunca a ejecutar por lo que tampoco existen documentos posteriores que arrojen luz sobre el asunto. Por todo ello, se han asignado materiales sencillos a los que pudo tener acceso Betancourt en la época. Los materiales elegidos aparecen en la biblioteca de materiales que facilita el propio software, y son los que a juicio de los autores se ajustan mejor a los requerimientos de cada elemento: hierro fundido para piezas metálicas, y roble para las de madera.

El software utilizado (Autodesk Inventor Professional) facilita las propiedades físicas de cada material: térmicas, mecánicas y los límites de elasticidad. El hierro fundido tiene un comportamiento isótropo y sus propiedades físicas principales son: módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (7.150 kg/m³) y tensión de rotura (758 MPa). La madera de roble tiene unas propiedades físicas que dependen de la dirección en la que se estudien ya que es un material ortótropo. Las condiciones más favorables se dan cuando el material trabaja en la dirección de la veta ya que en las otras dos direcciones ortogonales, las propiedades físicas son más limitadas. Por ello, es importante, que en las piezas de madera los ejes principales sean siempre los de la dirección de la veta: módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (760 kg/m³) y tensión de rotura (41 MPa).

3.5.3.3. Condiciones de contorno

Asignados los materiales y extraídos de la simulación aquellos elementos que no pueden someterse al análisis estático, la siguiente etapa es la de definir las condiciones de contorno de los elementos que tienen una función de apoyo. Cada apoyo puede funcionar de determinada manera atendiendo a los grados de libertad que definen su movilidad, de modo que la definición de esta movilidad, afectará al análisis estático del ensamblaje completo. Los apoyos pueden ser

empotrados, articulados, móviles o de rodillos. Así pues, el software estudia las condiciones de contorno en función de la libertad de movimientos de cada componente del apoyo.

En primer lugar, se definen los elementos que no tienen ninguna libertad de movimiento, es decir, las superficies que están empotradas a la fábrica de ladrillo, como son los apoyos de los distintos ejes (Figura 3.120 (Superior Izda.)), así como aquellos que están atornillados en el muro de ladrillo (Figura 3.120 (Superior Dcha.)).

En segundo lugar, se definen las articulaciones o elementos que tienen libertad para girar libremente. Estos componentes no pueden desplazarse longitudinalmente pero sí pueden rotar, por lo que tienen un grado menor de libertad (restricción por rodadura). Entre ellos, se encuentran las bisagras de los contrapesos, las poleas, y las fijaciones del eje (Figura 3.120 (Inferior Izda.)).

Por último, habría que definir aquellas superficies del apoyo que tienen libertad en una sola dirección, pero en la esclusa no hay ninguna.

Las condiciones de contorno no dependen de las dos posiciones extremas que se han propuesto para el análisis estático, pero sí cambian los contactos entre las piezas dependiendo de la posición a estudiar. Autodesk Inventor Professional detecta automáticamente los contactos existentes entre las superficies contiguas siempre y cuando la superficie no sea excesivamente compleja. Cuando el émbolo buzo está completamente fuera del agua, la cadena se apoya en su parte media sobre la polea.

Sin embargo, los contactos entre las cadenas y las poleas merecen una cuidada atención. Pese a que en el modelo se ha definido que varios eslabones son tangentes a la polea, de hecho, la geometría de ambos elementos hace que su correcto posicionamiento no se dé, por lo que es necesario definirlos manualmente. Esta operación hay que realizarla en cada una de las cuatro cadenas (Figura 3.120 (Inferior Dcha.)).

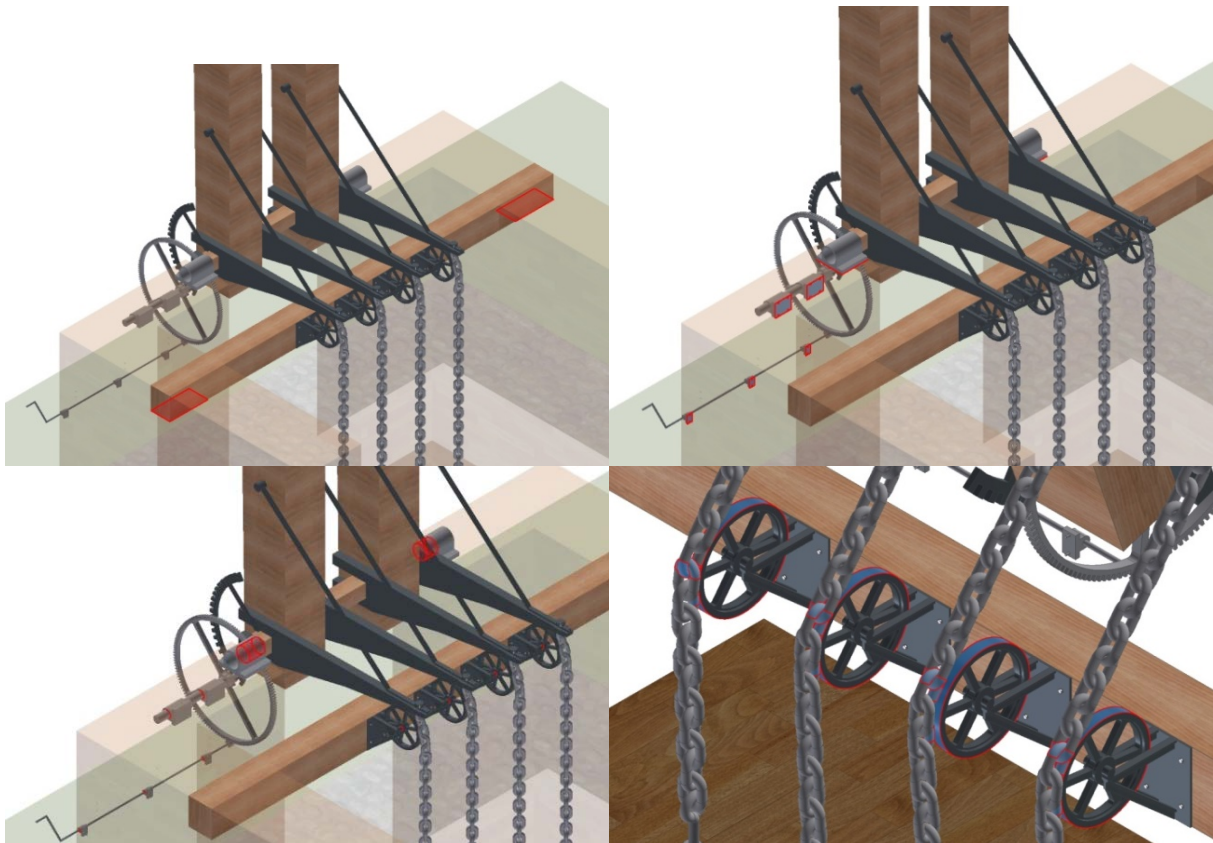


Figura 3.120. Restricciones: Fija y atornillada (Superior) y de rodadura y de contacto manual (Inferior).

3.5.3.4. Fuerzas aplicadas

La penúltima etapa antes de la simulación, consiste en definir las fuerzas que van a actuar sobre el conjunto. Las solicitaciones que va a sufrir la esclusa se deben fundamentalmente a la gravedad, pero, como se ha explicado en el apartado de preprocesado, al no poder incluir el agua en el análisis de tensiones hay que sustituirla por una fuerza equivalente que actuará como una presión uniforme sobre la superficie inferior del mismo. Asimismo, cuando el émbolo está sumergido, esta presión no actúa, por lo que sólo hay que considerarla cuando el buzo esté levantado.

El software utilizado permite definir con precisión la gravedad y su dirección. Si se ha respetado la dirección de los ejes en el CAD previo, el vector gravedad se definirá con una intensidad de $(9,81 \text{ m/s}^2)$ en la dirección del eje Z y en sentido negativo. Si se define así, sin determinarlo en un punto concreto, el propio software representa la gravedad aplicada en el centro de masas del conjunto, aunque afecte a todos los elementos (Figura 3.121 (Izda.)).

Por otro lado, la presión sobre el fondo del émbolo buzo (Figura 3.121 (Dcha.)) (modelizado como una caja vacía), es la que corresponde a la presión ejercida por un volumen de agua equivalente al volumen interior de la caja. Las dimensiones del interior de dicho émbolo son $4,713 \times 3,413 \times 4,730 \text{ m}$, por lo que su volumen es de $76,0842 \text{ m}^3$. Sabiendo que la densidad del agua es de $0,998 \text{ g/cm}^3$, se obtiene una masa de agua de $75.954,925 \text{ kg}$.

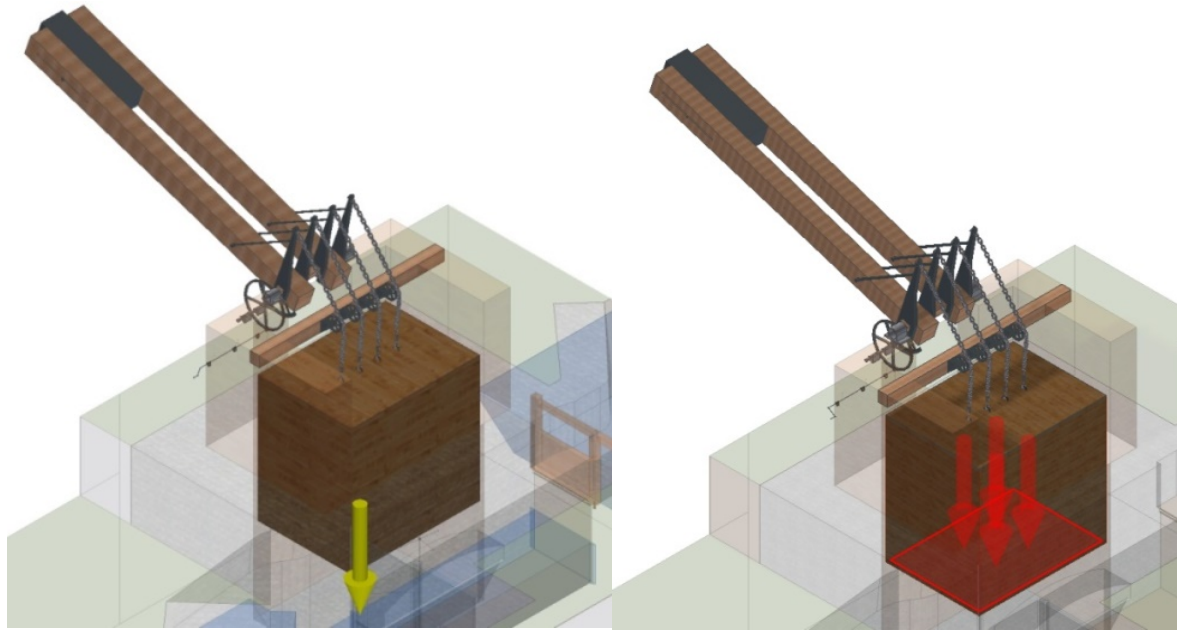


Figura 3.121. Fuerza gravitatoria (Izda.) y de presión uniforme en el fondo del buzo (Dcha.)

Así pues, la fuerza que ejerce esa masa de agua en el fondo del émbolo buzo resulta ser:

$$F = m \cdot g = 75.954,925 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 745.117,81 \text{ N}$$

Por lo tanto, la presión derivada de esa fuerza F sobre la superficie S aplicada es la siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{745.117,81 \text{ N}}{16,085 \text{ m}^2} = 46.323,76 \text{ Pa}$$

3.5.3.5. Discretización o mallado

La última etapa antes de la simulación, consiste en discretizar el modelo elaborando un mallado geométrico que se ajuste de una manera realista a la geometría del mecanismo. En un principio, cuanto menor sea el tamaño del mallado, mejor va a ajustarse a la realidad representada. En principio, los elementos más pequeños necesitan un tamaño de malla mucho más estrecho que los elementos grandes, pero como se comprobará, hay que hacer excepciones a esta regla general. Por otra parte, conviene que los lugares donde se aplican las fuerzas directamente también tengan un tamaño de malla menor, ya que una distorsión en la geometría de estos lugares tiene gran repercusión en toda la pieza, ya que se distorsiona la sollicitación desde su origen.

Autodesk Inventor Professional discretiza automáticamente el modelo, aunque las variables para la confección de la malla se puedan modificar. Los valores por defecto con los que trabaja son un tamaño medio para la malla del 10% de la longitud del elemento a discretizar, un tamaño mínimo del elemento del 20% del tamaño medio, un factor de modificación con valor de 1,5, y un ángulo máximo de giro de 60°. Para la presente simulación estos valores son perfectamente asumibles, aunque posteriormente se comprobará que para algunos elementos este mallado es excesivo (Figura 3.122).

Asimismo, el software permite realizar un mallado manual para establecer una malla determinada en superficies concretas. No es necesario realizar el refinamiento del mallado en las

zonas en las que se aplican las fuerzas porque la única que se aplica a un cuerpo concreto, la presión del fondo del émbolo buzo, se aplica a una gran superficie de geometría sencilla.

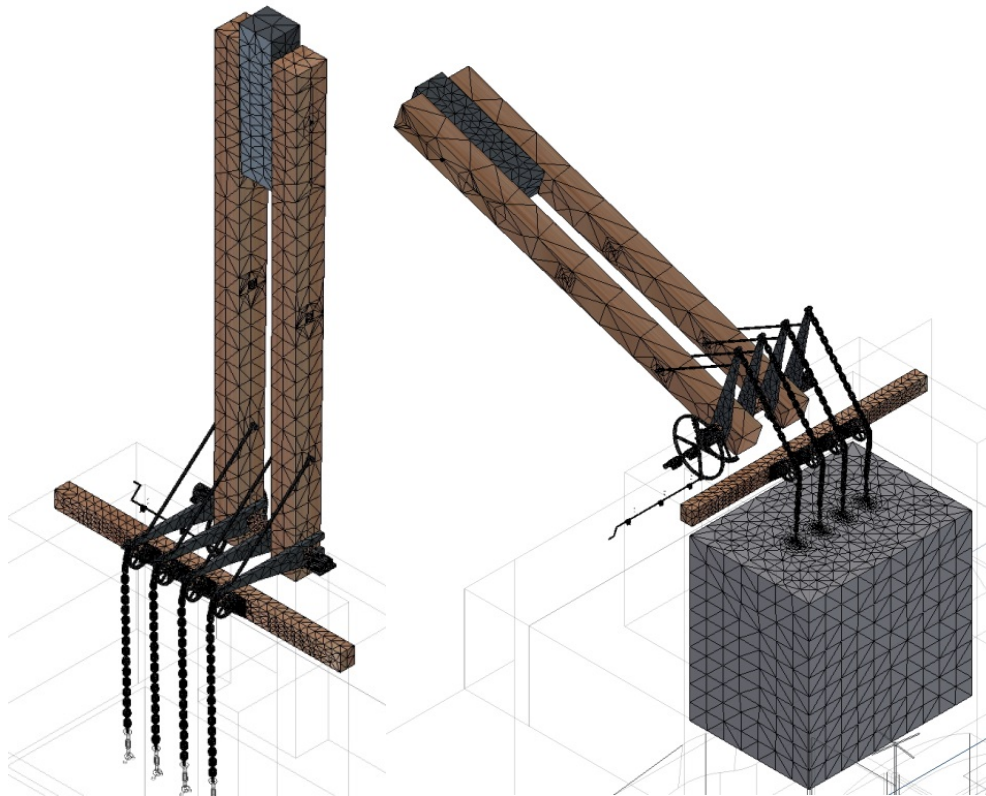


Figura 3.122. Discretización automática proporcionada por el software.

Por otro lado, en el presente estudio existe un problema con las cadenas que elevan el émbolo buzo, casi irresoluble. Los eslabones de dichas cadenas se han definido individualmente mediante el barrido de un sector circular sobre una el trazado de una curva cerrada, siendo esa geometría tórica por sí sola, complicada para el análisis computacional. Para poder ensamblar los eslabones de la cadena, uno con otro, ha sido necesario en primer lugar, definir un par de puntos en la superficie del eslabón, uno en la zona interna superior y otro en la inferior, y seguidamente restringiendo por oposición el punto superior de un eslabón con el inferior del otro.

Cada eslabón es relativamente pequeño y su mallado medio de un 10 % de su longitud. Además, al tratarse de un elemento curvo, la densidad de la malla todavía es mayor en la zona interior del eslabón, precisamente en la curva interior donde se ha definido el punto de contacto entre eslabones, de manera que para el análisis computacional el contacto entre eslabones sigue localizándose en un punto por lo que las tensiones obtenidas son mucho mayores que las reales.

Para ello, el control de la malla local permite en este caso tomar un tamaño de malla mayor para que el punto de contacto presente una mayor superficie, y disminuyan las tensiones. Esta acción suaviza el problema presentado, aunque no lo resuelve, adoptando un tamaño medio de malla de 20 mm en las superficies superior e inferior del eslabón. La Figura 3.123 muestra el mallado en los eslabones tras modificar su tamaño. Se puede apreciar cómo, a pesar de aumentar el tamaño de malla en la zona interna del eslabón, el mallado es más denso que en la zona externa, debido a su geometría curva.

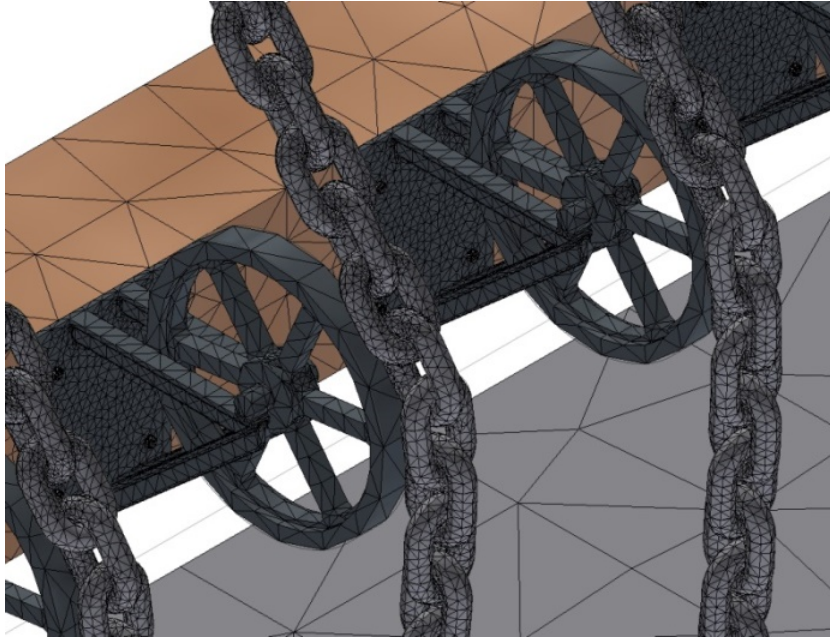


Figura 3.123. Discretización obtenida tras el refinamiento de los eslabones de la cadena.

3.5.3.6. Resultados y discusión

Los resultados de la simulación se expondrán en la forma de tensiones de von Mises, coeficiente de seguridad, deformaciones y desplazamientos.

El análisis estático se ha realizado atendiendo a las posiciones extremas de la esclusa, es decir, cuando el émbolo buzo está completamente bajado y cuando está en su punto más alto.

Respecto a las tensiones de von Mises se puede ver que cuando el buzo está bajado, en líneas generales no hay ningún elemento sometido a grandes tensiones (Figura 3.124 (Izda.)). Así pues, el punto de contacto entre la polea de la derecha y la cadena es el punto de mayor tensión con un valor de 219,3 MPa. Por el contrario, cuando el émbolo está levantado, se aprecia que muchos elementos trabajan a tensiones muy altas (Figura 3.124 (Dcha.)). El elemento sometido a una mayor sollicitación resulta ser también el contacto entre una polea y la cadena, pero justo la opuesta, es decir, la polea de la izquierda. El eslabón que está en contacto está sometido a una tensión de 2.643 MPa, muy por encima de la tensión de rotura (Figura 3.125).

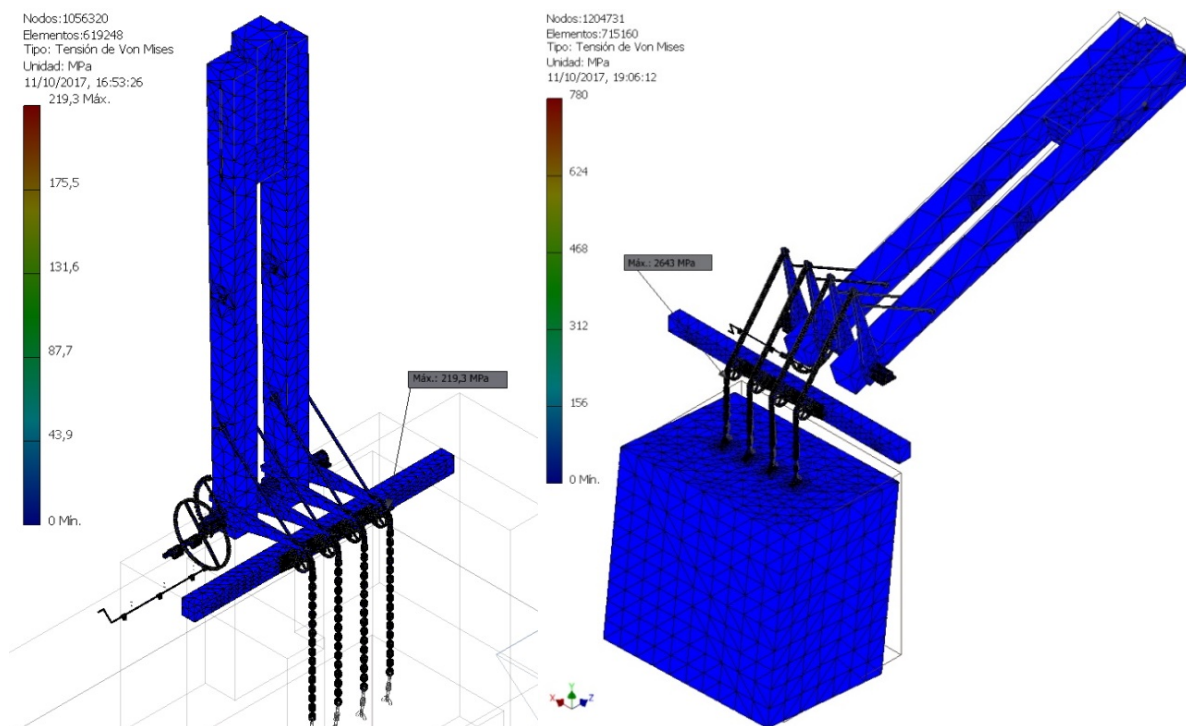


Figura 3.124. Tensiones de von Mises del émbolo buzo en su posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.).

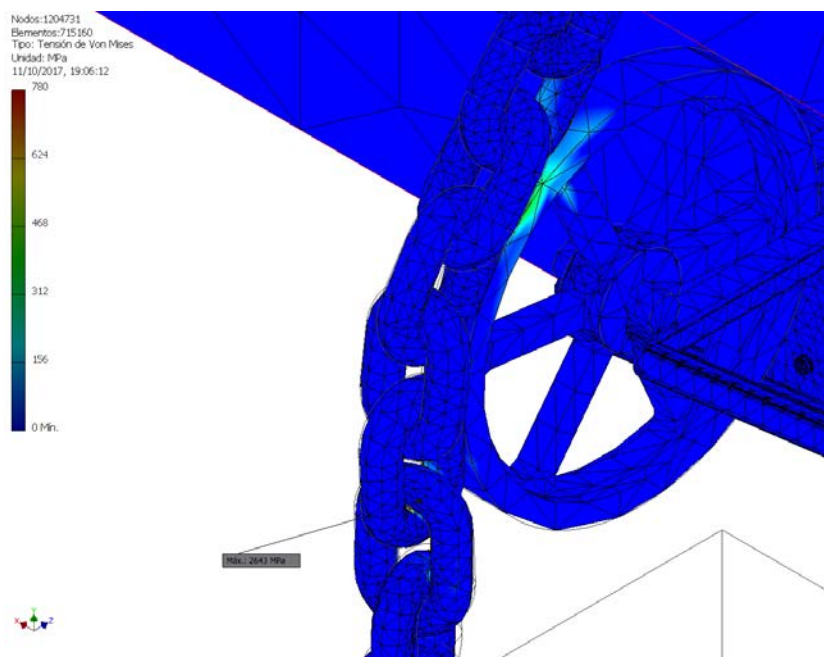


Figura 3.125. Detalle de la tensión de von Mises en el eslabón.

Una observación detallada de otros lugares, muestra también que son varios los puntos sometidos a tensiones excesivas. En las Figuras 3.126 Izda. y Dcha., se aprecian elementos con tensiones cercanas a 2.000 MPa; en concreto se trata del eslabón del extremo del brazo del contrapeso (1.859 MPa), y del enganche de longitud variable que une el émbolo buzo y la cadena (1.843 MPa).

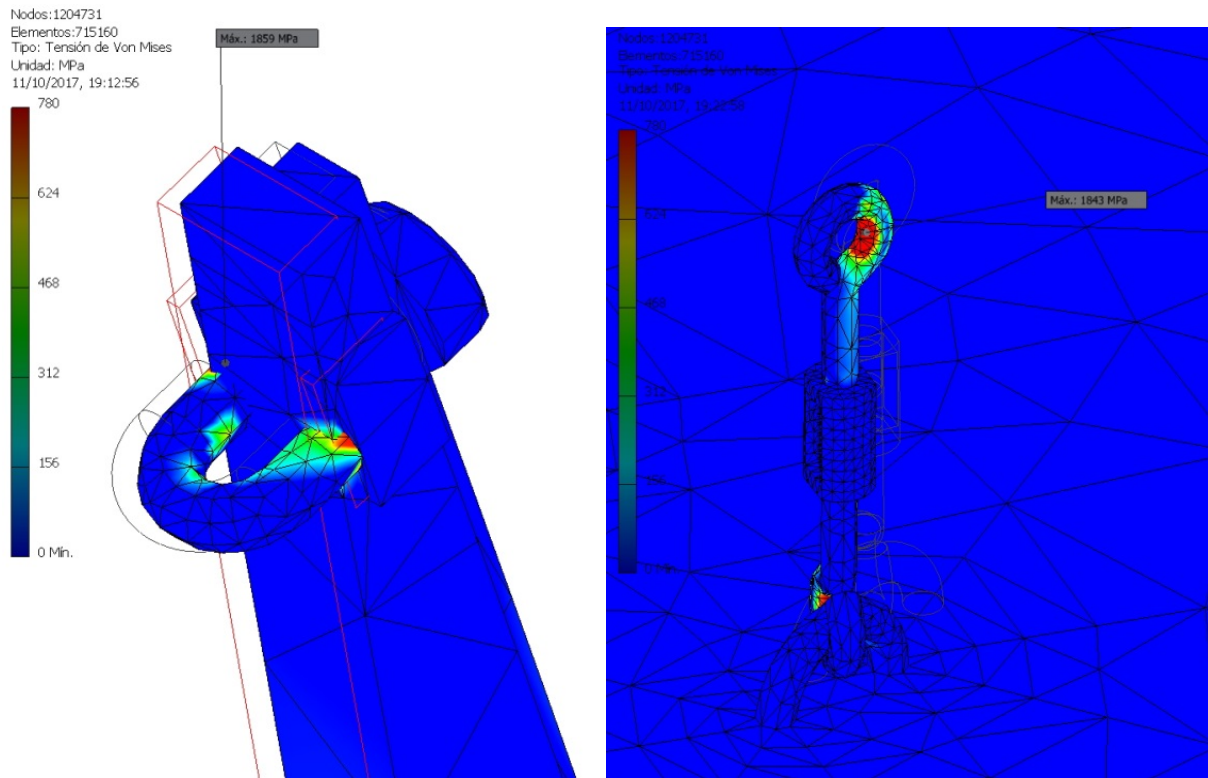


Figura 3.126. Zonas con tensiones de von Mises elevadas.

La explicación de porqué estos elementos están excesivamente solicitados, se encuentra respondida al hablar de la densidad de la malla, ya que hoy en día, una cadena de eslabones de hierro fundido de 25 mm de diámetro levanta, con suficiente solvencia, una masa de 200 Tn, mientras que, en el presente análisis estático, eslabones de casi dos pulgadas, rompen soportando una tensión derivada de una masa similar. Esto ayuda a comprender que no se trata sólo de un problema dimensional sino derivado del propio análisis.

A pesar de esta observación, los resultados en otros elementos sí muestran problemas con las dimensiones. Se conoce que la que la tensión de rotura para compresión en una dirección paralela a la veta de la madera de roble es de 41 MPa, y la del hierro fundido, 758 MPa. Así pues, los resultados muestran que varios elementos del conjunto trabajan por encima de esos límites, y por lo tanto romperían.

Un segundo factor que permite observar hasta qué punto la esclusa está trabajando por encima de sus posibilidades, es el coeficiente de seguridad. Este coeficiente se calcula como la división entre la tensión de von Mises para cada elemento, y el límite elástico de dicho elemento. Trabajar con un coeficiente de una unidad significaría que el elemento está trabajando en el límite elástico del material, y por lo tanto, corre riesgo de romper. La escala de del coeficiente de seguridad va de 0 a 15, estimándose que un elemento está correctamente dimensionado cuando trabaja en un rango entre 2 y 4.

En la Figura 14 se observa el coeficiente de seguridad cuando el émbolo buzo está en las dos posiciones extremas. Cuando está en el punto más bajo, casi todo el conjunto tiene un coeficiente de seguridad muy alto. El punto que presenta un coeficiente de seguridad menor (Figura 3.127 (Izda.)), es el eje del contrapeso con un valor de 2,91. Por lo tanto, en conjunto todo el

mecanismo trabaja lejos de su punto de rotura, incluso podría decirse que está algo sobredimensionado.

Sin embargo, cuando se analiza la posición más alta del émbolo buzo, el resultado cambia notablemente. Atendiendo a la Figura 3.127 (Dcha.), se puede observar que algunos elementos trabajan por debajo del óptimo para el diseño, e incluso por debajo de la unidad. El elemento que está peor dimensionado, atendiendo a este análisis, es el brazo de madera del contrapeso situado en el extremo izquierdo. El punto en el que éste entra en contacto con el primer eslabón de la cadena es el más inseguro con un valor de 0,18. Sin embargo, este elemento no es el único que llama la atención por su bajo coeficiente de seguridad, sino que el resto de brazos, el rigidizador metálico, las cadenas, las poleas y sus soportes trabajan con valores comprendidos entre 0,5 y 2. En este caso, ya no es sólo una cuestión derivada de los problemas que pueda tener el software al analizar la cadena, sino de que la invención está mal dimensionada si se atiende a la planimetría utilizada para obtener el modelo 3D del conjunto.

Otro punto llamativo se encuentra en la tuerca del contrapeso móvil. Esta tuerca también estaría mal dimensionada para hacer frente al esfuerzo originado al fijar el contrapeso de casi 10 Tn que hay entre los contrapesos de madera. Su coeficiente de seguridad también es de 0,18. Probablemente, redimensionando tanto el eje como la tuerca, y tomando unas dimensiones mayores, se podría solucionar este problema puntual.

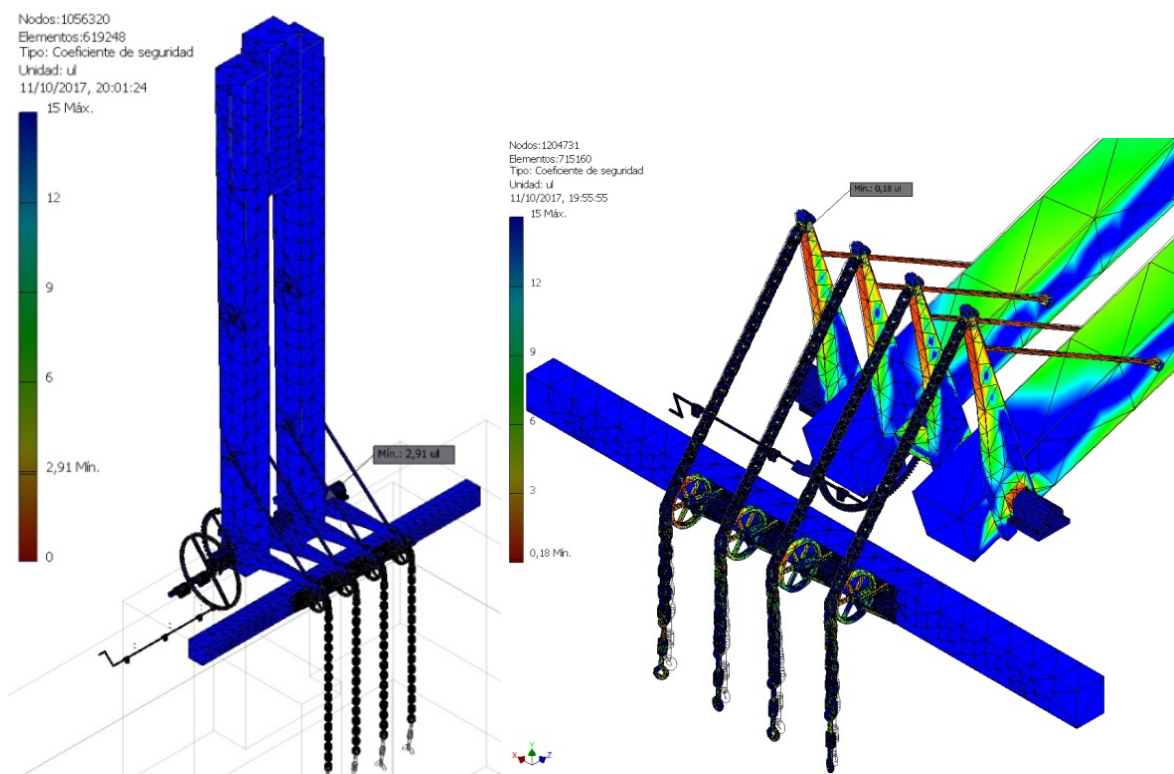


Figura 3.127. Coeficiente de seguridad del émbolo buzo en la posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.).

Por otro lado, en el caso de las deformaciones equivalentes (división entre el tamaño de la deformación y la longitud del elemento), se encuentran resultados similares derivados de los dos anteriores. Por un lado, cuando el émbolo buzo está en la posición más baja, el conjunto no presenta grandes deformaciones, produciéndose la deformación más alta en el apoyo de la cadena con la polea de la derecha con un valor de 0,00159, lo que resulta casi imperceptible.

Por el contrario, cuando el émbolo buzo está en la posición más alta, se producen unas deformaciones bastante grandes con un valor máximo de 0,1349, lo que representa una deformación del 13.5% del tamaño del elemento. Dicha deformación se localiza en el enganche de la pieza de longitud variable y el enganche del buzo (Figura 3.128).

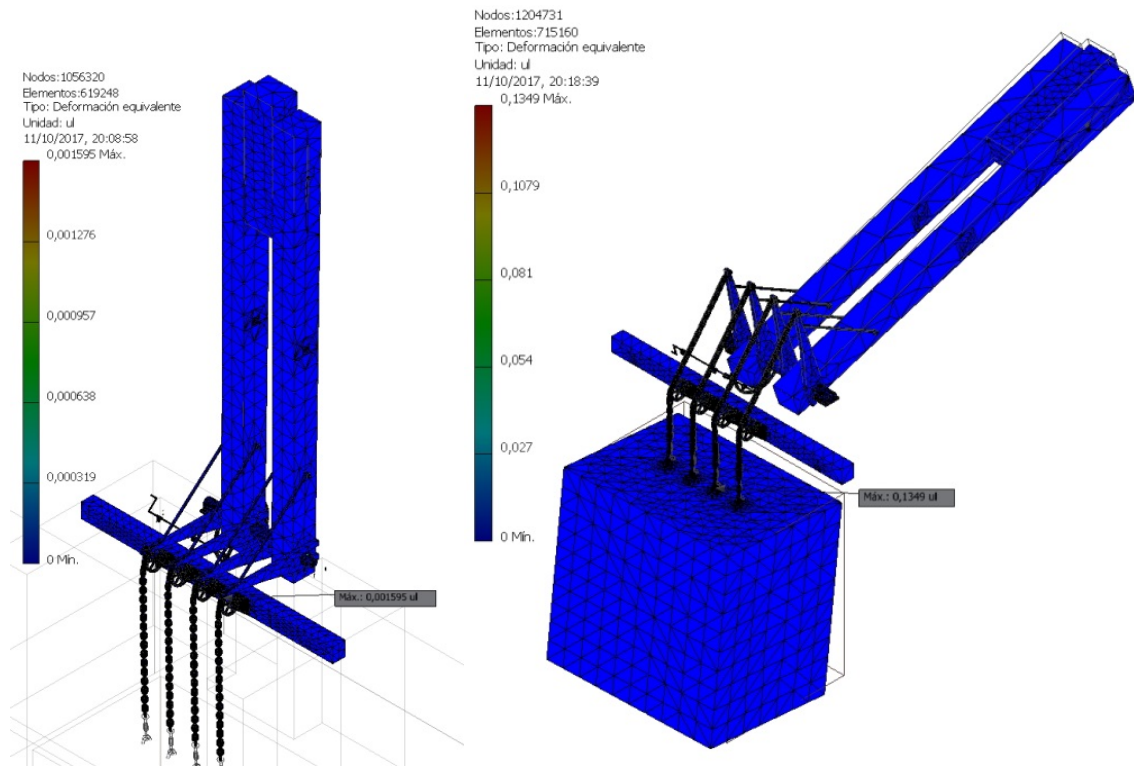


Figura 3.128. Deformaciones del émbolo buzo en la posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.).

Por último, los mayores desplazamientos, cuando el émbolo buzo está en la posición más baja, se producen en la parte superior del contrapeso, donde apenas llegan a los 4 mm, mientras que cuando dicho émbolo está en la posición más alta, los mayores desplazamientos se localizan en el propio émbolo que llega a sufrir un desplazamiento de 750 mm, un desplazamiento excesivo que nunca se llegaría a producir, ya que las paredes del foso impedirían un extremo tal, pero que hacen ver lo problemático de esta posición extrema (Figura 3.129).

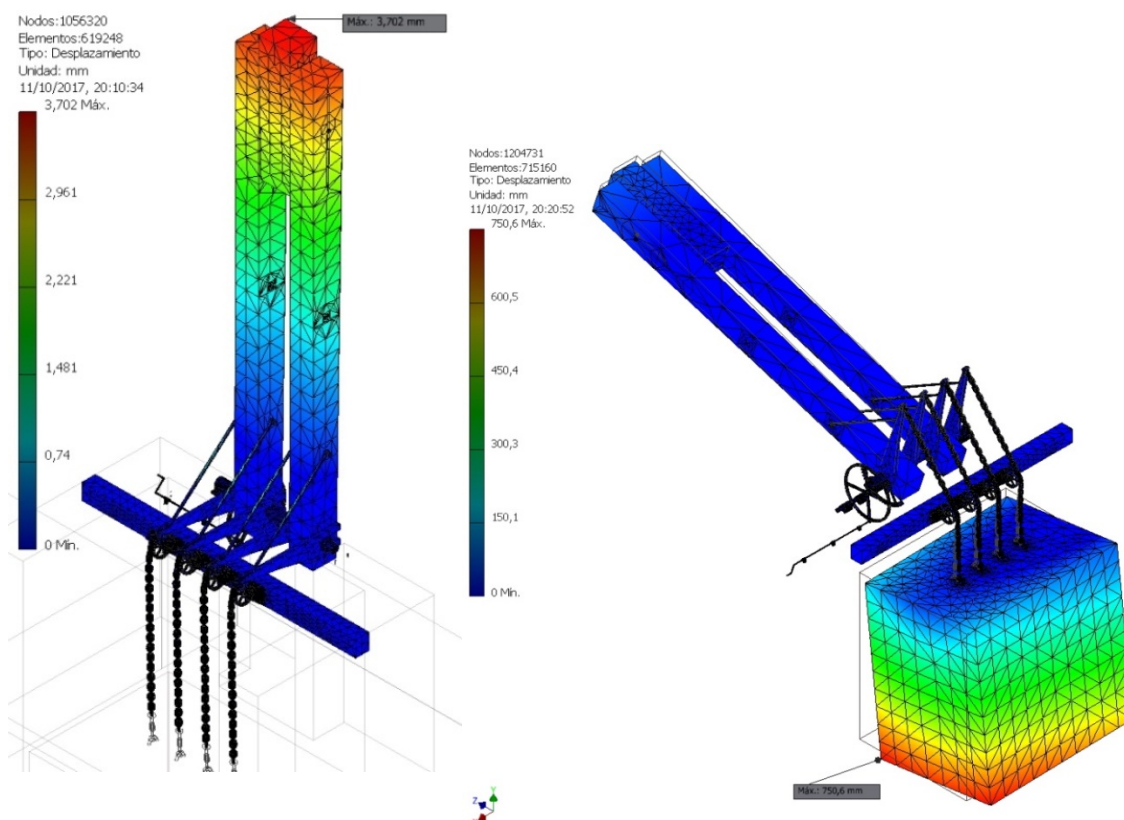


Figura 3.129. Desplazamientos del émbolo buzo en la posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.).

3.5.3.7. Conclusiones

Se muestran los resultados del análisis estático mediante técnicas de ingeniería asistida por ordenador realizado al modelo 3D de la esclusa de émbolo buzo diseñada por Agustín de Betancourt y Molina en 1807, y realizado con Autodesk Inventor Professional.

El alto número de componentes, la complejidad de los mismos y los materiales empleados en algunas partes, ha justificado un preprocesado para simplificar el conjunto antes de la simulación, sin afectar a los resultados obtenidos, pero disminuyendo significativamente los requerimientos computacionales y el tiempo de la simulación. Sin embargo, y en opinión de los autores, la simulación de algunos elementos (fundamentalmente las cadenas), es una asignatura pendiente del software empleado, siendo un problema común, a la mayoría de ellos.

Respecto a los resultados obtenidos, cabe decir que las tensiones más altas que soporta el conjunto se producen cuando el émbolo buzo está levantado y, por lo tanto, toda la estructura debe soportar los pesos de dicho émbolo y del contrapeso (un valor cercano a las 200 T). Asimismo, se comprueba que algunos de los elementos tienen solicitaciones excesivas, aunque al estudiar el coeficiente de seguridad del conjunto, llama la atención que no se trata solamente de un problema determinado debido a los límites del propio software, sino que el diseño de Betancourt, atendiendo a las dimensiones y proporciones de los planos existentes, está mal realizado; las deformaciones y desplazamientos no hacen sino confirmar esta afirmación.

El análisis histórico de esta invención ha mostrado que la esclusa de émbolo buzo nunca llegó a ponerse en práctica. Las láminas y planimetría utilizadas por Betancourt no tenían la intención de ser un modelo a escala con el que llevar a la práctica dicha invención, sino que servía más bien para un doble propósito: por un lado, esos planos eran la carta de presentación del

proyecto ante un posible mecenas, y por otro, buscaban reafirmar la solución teórica a la que había llegado el ingeniero en su memoria, por lo que eran más conceptuales que técnicos.

Una lectura detenida de la memoria y el conocimiento que se deriva del presente estudio, podrían dar lugar a un artículo en el que se expusiera porqué Agustín de Betancourt dimensionó de manera errónea su esclusa.

Lo dicho hasta ahora no desdice en absoluto, la genialidad del invento ni de la efectiva existencia de una solución teórica que materialice la idea del ingeniero español: la creación de una esclusa fácilmente manipulable, sin consumo energético, que aprovechara al máximo los recursos hidráulicos del canal a partir de un sistema en equilibrio.

3.5.4. Impresión 3D

La impresión 3D de la esclusa de émbolo buzo presenta grandes dificultades derivadas no de la complejidad de los mecanismos sino de la aparición de cadenas y de su enorme tamaño. Una primera dificultad, parte de la cantidad de entorno que hay circunscrito al canal. Se podría tratar de modelar la esclusa prescindiendo del entorno, pero al hacerlo se perdería el sentido de la invención, por lo que se ha afrontado la impresión del ingenio con todos los elementos. Asimismo, la elección de la escala la ha determinado la distancia existente entre el fondo del foso y la altura de la fábrica de ladrillo, persiguiendo que ésta entrara dentro de los límites de la impresora, aproximadamente 25 cm. Tomando esta referencia se ha adoptado para el modelo una escala de 1:50, y aunque posteriormente se ha podido comprobar insuficiente, trabajar con escalas mayores con las impresoras disponibles hubiera dividido en exceso las piezas.

La primera consecuencia de la elección de esta escala ha sido la necesidad de partir el terreno en dos partes para poder ser impreso. De nuevo, como ocurría con la fábrica de ladrillo del molino de sílex, se ha dividido el terreno en ficheros independientes STL que posteriormente se ensamblarían. De todos modos, la cantidad de material empleado en la impresión de cada una de estas dos partes es tan grande que ha habido que elegir rangos de densidad de material muy pequeños para su impresión. El resto de piezas han sido exportadas individualmente utilizando la escala anteriormente comentada, pero han presentado dificultades como se explicará al hablar de los resultados. Por último, ha habido un grupo de piezas que no han sido modeladas, concretamente las cadenas y los enganches con el buzo. En un momento se planteó su modelización y se hicieron pruebas para su impresión con un material flexible, pero las dimensiones de los eslabones al trabajar con la escala elegida eran insuficientes, y la impresora no era capaz de definir elementos tan pequeños.

El propio software de la impresora importa los ficheros STL y simula las condiciones de impresión para reproducir de un modo realista las piezas importadas, orientándose en el simulador cada una de las piezas con el fin de obtener la menor cantidad de plástico soporte, ya que éste impide generar piezas de mejor definición. Lo positivo de la impresión de la esclusa ha sido que, prácticamente debido a la sencillez de sus mecanismos, no ha habido elementos que presentaran excesivo soporte y han podido ser perfectamente impresos. Así pues, el terreno, el buzo, los contrapesos y las compuertas han sido impresos en PLA estándar con la impresora Airwolf, y el resto de piezas que necesitaban un nivel mayor de acabado, fueron impresas con la Stratasys Objet 30 utilizando resina fotosintética líquida.

Aun así, los resultados no han sido los esperados, ya que los ejes de los engranajes traseros y la manivela salían excesivamente débiles debido al material utilizado. Por otro lado, las poleas

también presentaban unos radios excesivamente delicados que rompían en el proceso de limpieza al intentar eliminar el material de soporte. En resumen, muchas de las piezas del mecanismo eran excesivamente pequeñas respecto al conjunto, y esto ha obligado a redimensionar, dando un mayor diámetro a las piezas que tenían problemas de esbeltez, fundamentalmente las poleas con sus soportes, la manivela e incluso al eje y bisagras principales del contrapeso. Estos cambios han provocado que la relación de algunos elementos no sea proporcional, pero se ha salvado lo esencial del mecanismo. Por otro lado, se ha decidido sustituir las cuatro cadenas por cable, que en este caso se ha impreso con PLA flexible en la misma impresora Airwolf. Todos estos problemas, trasladados después al montaje, ya eran conocidos, pues el estudio CAE del ingenio había arrojado que las estructuras fallaban en varios lugares, por lo que se concluía que estaban mal dimensionadas.

El ensamblaje, sin presentar especiales dificultades, también presenta un procedimiento ordenado. En primer lugar, se ha vuelto a ensamblar el terreno, y posteriormente se han incluido las compuertas y la llave de apertura de la compuerta inferior. A continuación, se ha introducido el contrapeso en el foso a la espera del ensamblaje de otros elementos, y dos conjuntos han sido ensamblados aparte: la viga puente con sus cuatro soportes y poleas, y los contrapesos, con el contrapeso móvil y sus brazos que han sido insertados en su eje. La viga puente no presenta casi dificultades al añadirlo al terreno, pero no ocurre lo mismo con el sistema del contrapeso, ya que las bisagras que lo fijan a la fábrica de ladrillo, deben de estar correctamente posicionadas para que los brazos caigan sobre las poleas y el engranaje del eje esté en su correcta posición. Por último, el resto de engranajes que permiten el movimiento del contrapeso tienen que estar perfectamente colocados para que el sistema funcione. Sin embargo, el cambio de dimensiones en la manivela debido a su esbeltez ha provocado que el mecanismo no engrane correctamente. Para finalizar, se han colocado los cables en el extremo de los brazos, y se han atado con el anclaje de la parte superior del buzo (Figuras 3.130 a 3.132).

A pesar de las relativas dificultades presentadas para la obtención de la impresión 3D, se plantean algunas dudas sobre el montaje general de la esclusa. Por un lado, para su montaje sería necesaria una estructura de grúas no pequeña pues el sistema de contrapesos con su eje llegaría a las 25 Tn, y el buzo cargado de agua a las 92 Tn. Como ya se comentó en las conclusiones del estudio CAE, el ingenio redimensionado es perfectamente factible, pero para su época, sólo su montaje hubiera supuesto un reto de una gran envergadura.



Figura 3.130. Vista general de la impresión 3D.

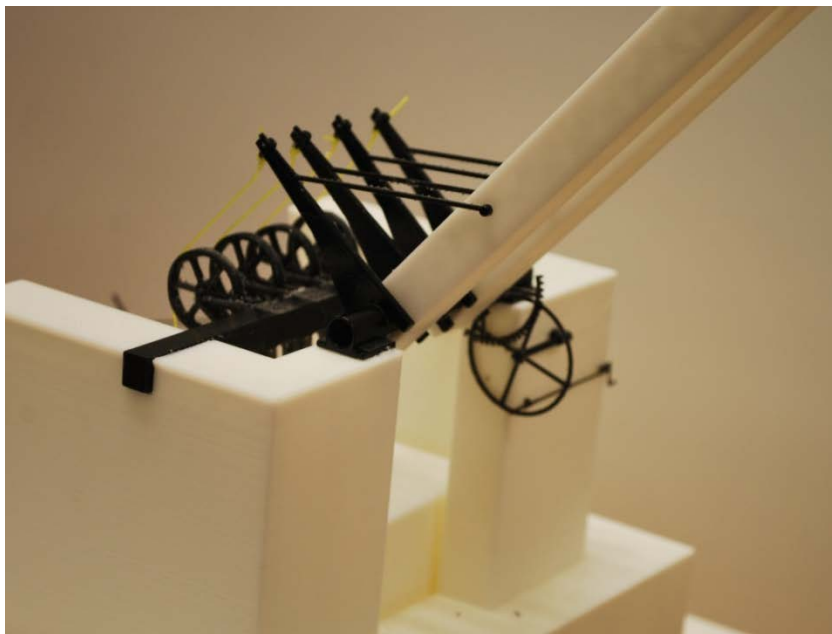


Figura 3.131. Detalle de la parte posterior.

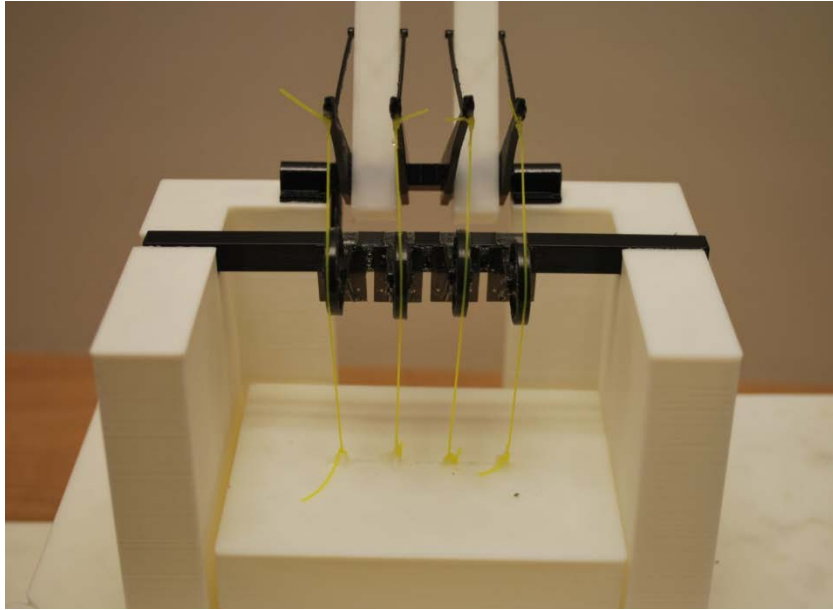


Figura 3.132. Detalle de las cadenas.

3.6. Draga mecánica del puerto de Kronstadt

3.6.1. Introducción

A la vuelta de la estancia de formación en París y Londres, que le mantuvo alejado de la Península desde 1784 hasta octubre de 1792, Betancourt fue nombrado director del Real Gabinete de Máquinas del Palacio del Buen Retiro. Se sabe que, durante los últimos meses de libertad del conde de Aranda, su valedor, trabajó en el encargo de idear una máquina para dragar los puertos de Cádiz y Cartagena. La condena de Aranda y la llegada de Godoy al poder hicieron que los encargos que sacaba adelante el primero, alguno encomendado al ingeniero español, fueran desechados (Rumeu de Armas, 1990).

Pasaron los años y el proyecto de draga seguía en la mente del director del Real Gabinete. En 1808, cuando ya estaba por finalizar su estancia en París, debido a la ruptura de relaciones entre España y Francia, Betancourt tomó la decisión de trasladarse con su familia a Rusia. Mientras tanto, su compañero y amigo Gaspard Prony fue nombrado por Napoleón comisionado para inspeccionar los puertos de Ancona, Venecia y Pola. El matemático e ingeniero francés comprobó la urgente necesidad de limpiar el puerto de Venecia, casi bloqueado por el fango, y pidió ayuda a su colega Betancourt (Betancourt, 1808a y 1808b).

Así pues, éste rescató el proyecto de máquina dragadora para emplearlo en el puerto de Venecia y facilitó una memoria explicativa para su correcto montaje, pero se desconoce si el comisionado llegó a usar el invento del ingeniero español, ya que pocas semanas después, marchó a Rusia donde se ocupó de otros asuntos.

A su llegada a Rusia, donde gozó de todo el respaldo del zar Alejandro, Betancourt puso por obra muchos de los proyectos anteriormente desechados. En 1810, siendo inspector del departamento de Vías de comunicación, planteó la limpieza del puerto de Kronstadt, y para ello, retomó el proyecto de draga tomando como base el enviado a Prony pero mejorándolo sustancialmente. La draga flotante para el puerto de Kronstadt se materializó con éxito en 1812 y estuvo dando servicio hasta 1820 (Cioranescu, 1965).

Lo dicho anteriormente hace ver que las máquinas para dragar de las que se tiene documentación son ligeramente distintas. Ambas tienen una raíz común, la idea original de la máquina que pretendiera utilizar en los puertos españoles, pero como se puede apreciar a simple vista, la máquina dragadora de Kronstadt es técnicamente más perfecta que el modelo para el puerto de Venecia. Las ocho láminas elaboradas en Rusia son la base del modelo objeto de este trabajo.

Así pues, para la presente investigación se han utilizado fundamentalmente tres documentos: la memoria que Agustín de Betancourt escribe a Gaspard Prony de la máquina para dragar el puerto de Venecia, las láminas de dicha draga y las láminas ilustradas de la máquina para dragar el puerto de Kronstadt. Todos estos documentos se concretan en 16 láminas de dos máquinas dragadoras parecidas, y una memoria de descriptiva de 10 páginas.

La invención está fechada en 1810, y como explica la web del proyecto Betancourt, se conservan las láminas originales en el manuscrito 1478 de la Universidad de Vías de Comunicación de San Petersburgo (Betancourt y Molina, 1796c). En dicho expediente aparecen ocho láminas dibujadas a todo color. La primera, numerada con un 4 es un alzado del barco dragadora propulsado a vapor. La siguiente (número 5) es una vista de perfil del mismo con la draga funcionando. La tercera (número 6) es una vista de planta del barco. La cuarta (número 7) es especialmente interesante, pues se trata de la misma vista de perfil, pero con un corte longitudinal del barco, donde se aprecia el sistema de propulsión de la máquina dragadora (la máquina de vapor de doble efecto de Betancourt). El resto de láminas (de la 8 a la 11) son planos

detalle de las piezas que componen la máquina dragadora y de la “cuchara” para recoger obstáculos mayores del lecho marino.

Las láminas no tienen escala y como en otras invenciones del ingeniero, prima la finalidad funcional del plano frente a la métrica. Esto hace que no se tengan referencias de escala y que algunos detalles de la invención no se muestren, y debido a ello, haya sido necesario adoptar unas hipótesis geométricas y dimensionales para que el conjunto funcione perfectamente.

Las láminas y la memoria de la draga del puerto de Venecia, también disponibles en la web de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, han servido para contrastar algunas de estas hipótesis y para comprender mejor algunos de los elementos utilizados por Betancourt.

Así pues, se ha llegado a la conclusión de que el ingeniero omite algunos de los detalles de la draga porque ya están en los planos del modelo francés, por lo que simplifica las vistas dando mayor vistosidad al conjunto. Asimismo, las láminas del proyecto ruso pudieron ser utilizadas para convencer al zar Alejandro para dar el visto bueno a la empresa de la limpieza del puerto y no tanto, para acabar en manos de los mecánicos encargados de su confección.

En cuanto a la metodología empleada con el fin de obtener un modelo digital 3D, se ha utilizado el programa Autodesk Inventor Professional, software paramétrico de diseño asistido por ordenador desarrollado por Autodesk adecuado para obtener una restitución digital de la máquina dragadora.

Seguidamente, se muestra en detalle todo el proceso seguido en el modelado tridimensional y su documentación geométrica, explicando las restricciones aplicadas y las hipótesis adoptadas para que el diseño de la invención histórica fuera coherente.

3.6.2. Diseño Asistido por Ordenador

El proceso de modelado tridimensional ha sido bastante complejo por la ausencia de información de detalle, tanto gráfica como descriptiva. Las ocho láminas de la invención están dibujadas sin escala, y por tanto, en dicho proceso se ha respetado la proporcionalidad midiendo sobre dichas láminas para obtener un modelo CAD 3D fidedigno. Por ello, se han adoptado diversas escalas gráficas para que las dimensiones de los elementos del conjunto fueran las mismas en las dos láminas y dieran coherencia al mismo, permitiendo posteriormente un modelo consistente. No se trata, por tanto, de dibujos actuales en los que se incorpore información sobre procesos de fabricación o montaje, pues no estaban sujetos a un proceso de normalización, sino que se trata de diseños conceptuales que presentaban deficiencia de información técnica e incongruencia en las dimensiones de algunos elementos y que, en algunos casos, nunca fueron construidas.

Aun así, ha sido necesario realizar algunas hipótesis dimensionales y geométricas, así como restricciones de movimiento (grados de libertad) entre los diferentes elementos del conjunto, sobre todo en el sistema de maniobra para la transmisión del movimiento, así como en el funcionamiento mecánico del rosario de la draga. En el modelo no se ha hecho uso de ningún material estandarizado, ya que en la época todas las piezas metálicas eran de fabricación artesanal, y por el mismo motivo, tampoco tienen sentido el cálculo de tolerancias y juegos entre las piezas acopladas.

A diferencia de otros software paramétricos utilizados, el proceso de modelado con Autodesk Inventor Professional permite crear de forma paramétrica los componentes individualmente (.ipt), que pueden ser modificados en 2D con herramientas de la familia Autodesk como AutoCAD e importar diseños realizados previamente, para posteriormente formar el ensamblaje del conjunto (.iam) a base de restricciones de contacto y de movimiento en los componentes

individuales, es decir, limitando los grados de libertad de los mismos. Los límites que tiene el programa, por otro lado, lógicos, son comunes a los límites del resto de programas de modelado equiparables; así pues, y a modo de ejemplo, dicha limitación se ha puesto de manifiesto a la hora de modelar las cuerdas, las cuales pierden sus propiedades dinámicas. La Figura 3.133 muestra una perspectiva isométrica renderizada del modelo 3D obtenido con técnicas CAD de la máquina dragadora.

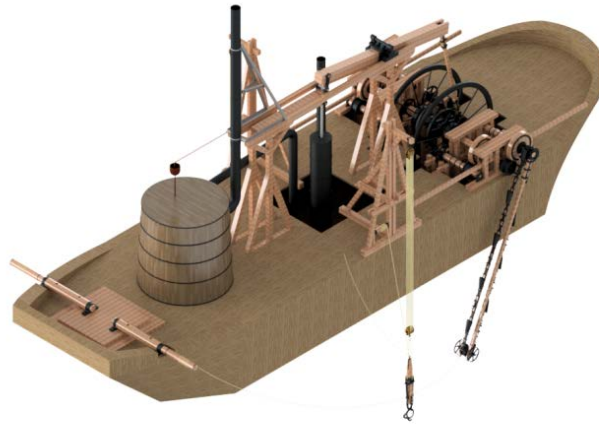


Figura 3.133. Perspectiva isométrica renderizada del modelo 3D completo.

Se trata de un barco de 33 m de eslora en el que hay un gran número de elementos. En primer lugar, se aprecia una máquina de vapor de doble efecto (la inventada por el propio Betancourt a partir de la de Watt) que tiene como finalidad mover un par de volantes de inercia que propulsan respectivamente sendas dragas de cangilones tipo 'Louis'. A los costados de la máquina de vapor aparecen dos grúas terminadas en pinza (cucharas). Por último, en la proa también existen dos ejes horizontales cuya finalidad será posicionar la draga a la altura querida.

La Figura 3.134 muestra el mismo barco, pero al que se ha suprimido el elemento impulsor para apreciar con mayor claridad el mecanismo de dragado que es el objeto de estudio.



Figura 3.134. Perspectiva isométrica simplificada para apreciar la draga y las cucharas.

Las Figuras 3.135 a 3.137 muestran los planos de conjunto de cada uno de los tres sistemas bien diferenciados: la draga (Figura 3.135), la cuchara (Figura 3.136) y el sistema de maniobra y elevación de la draga (Figura 3.137), indicando sus diferentes elementos o marcas. Por último, la

Figura 3.138 muestra la perspectiva estallada o de montaje, señalando el orden y dirección de ensamblaje del complejo sistema de draga.

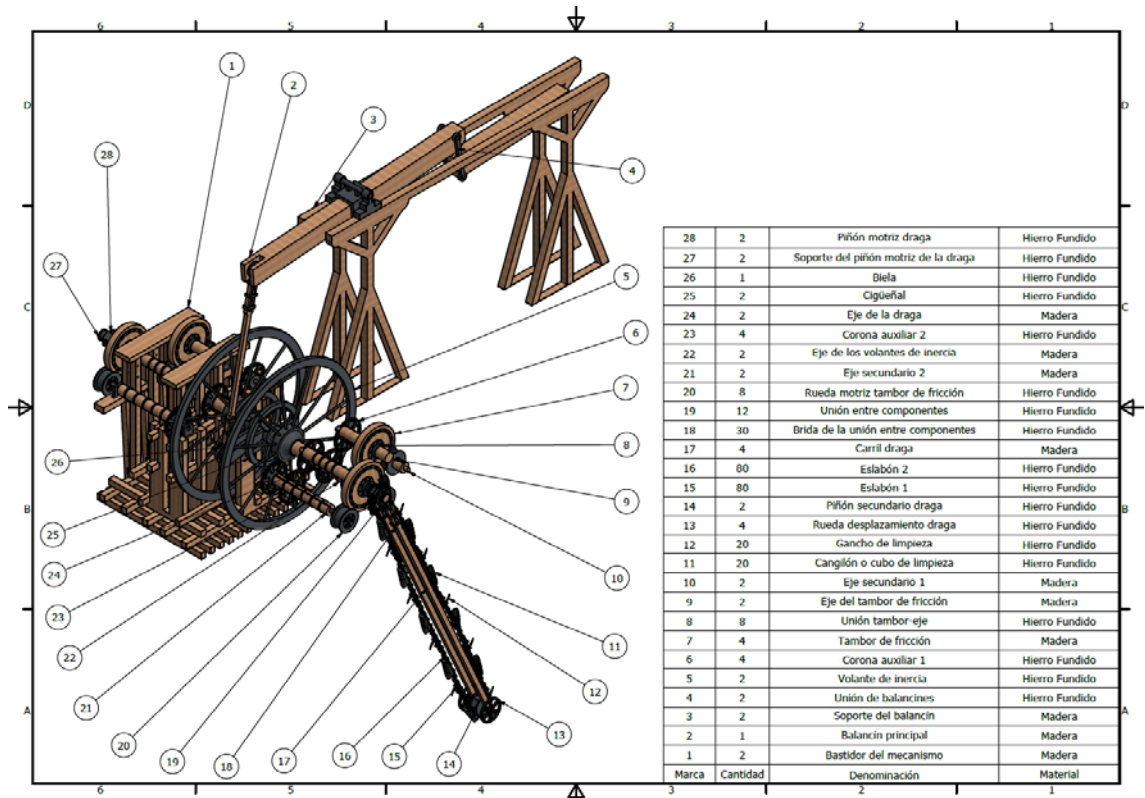


Figura 3.135. Plano de conjunto del sistema de la draga.

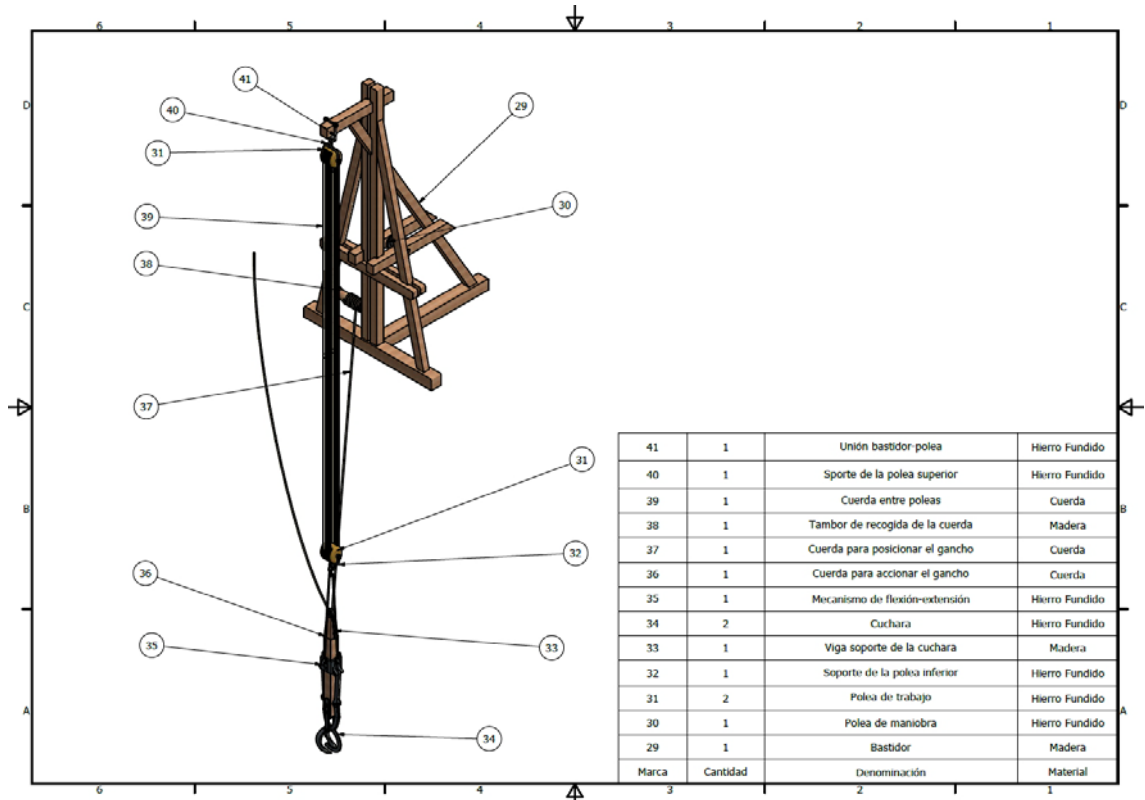


Figura 3.136. Plano de conjunto del sistema de cuchara.

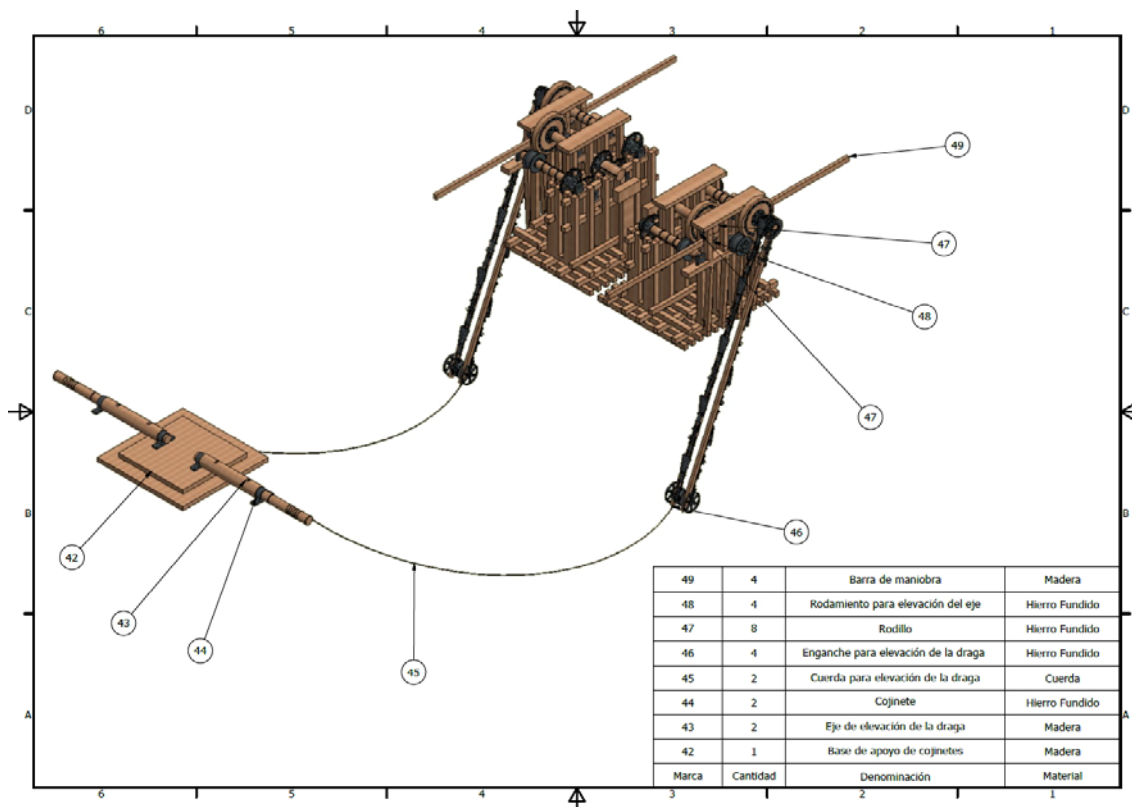


Figura 3.137. Plano de conjunto del sistema de maniobra y elevación de la draga.

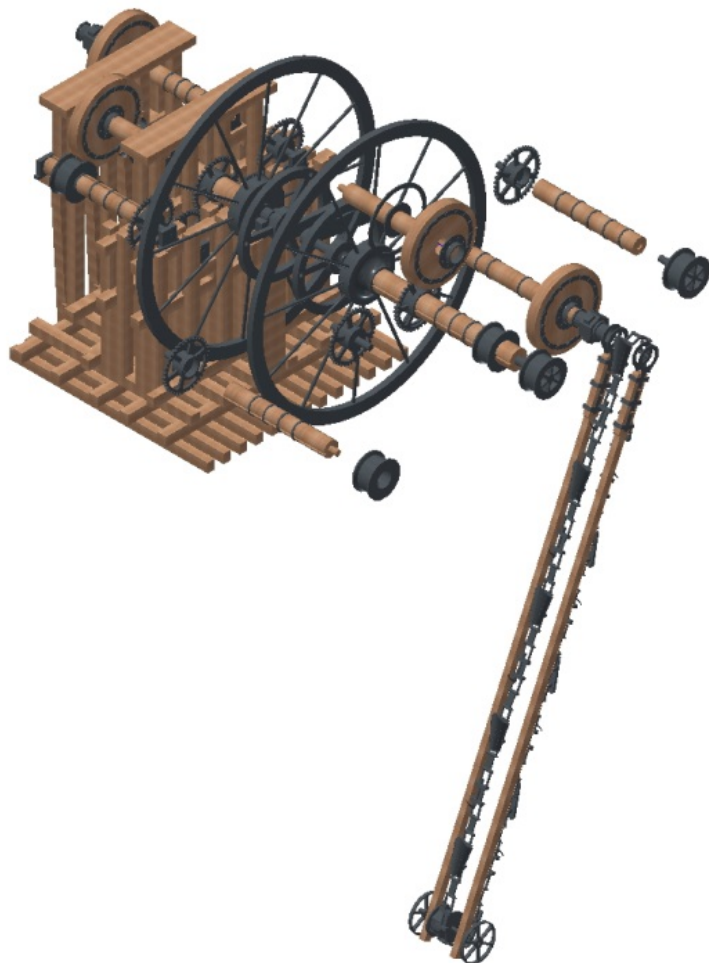


Figura 3.138. Perspectiva estallada del modelo 3D.

3.6.2.1. Funcionamiento

Para explicar el funcionamiento de la invención histórica se ha decidido dividir la misma en los tres sistemas bien diferenciados anteriormente comentados. Asimismo, es necesario comentar que se ha dejado de estudiar el sistema propulsor de la draga, ya que se trata de un sistema tan complejo que debería dar lugar a un estudio propio, estando basado en una adaptación de la máquina de vapor de doble efecto de Betancourt.

El primer sistema que se analiza es el de la draga. Se trata de una draga de cangilones tipo Louis, y así lo afirma el propio Betancourt en la memoria que escribe para la máquina dragadora del puerto de Venecia. El sistema de draga ingeniado no tiene como objeto solamente la retirada de lodos y tierra del fondo de los puertos, sino también el desplazamiento del barco. En otras palabras, los cangilones no sólo retiran tierra del fondo, sino que funcionan como un sistema oruga facilitando el movimiento del barco.

Para entender el funcionamiento de un mecanismo tan complicado se debe apreciar la Figura 3.135. Se conoce que el mecanismo propulsor mueve un eje acoplado a la unión de los dos balancines (4). El balancín principal (2), el situado más próximo a la draga, está unido por uno de sus extremos una biela (26), y ésta conecta con un cigüeñal (25) muy particular, ya que mueve dos grandes volantes de inercia (5), y estos están solidariamente unidos a un eje principal (22). Así pues, biela y cigüeñal consiguen transformar el movimiento de balanceo en otro de rotación (Figura 3.139).

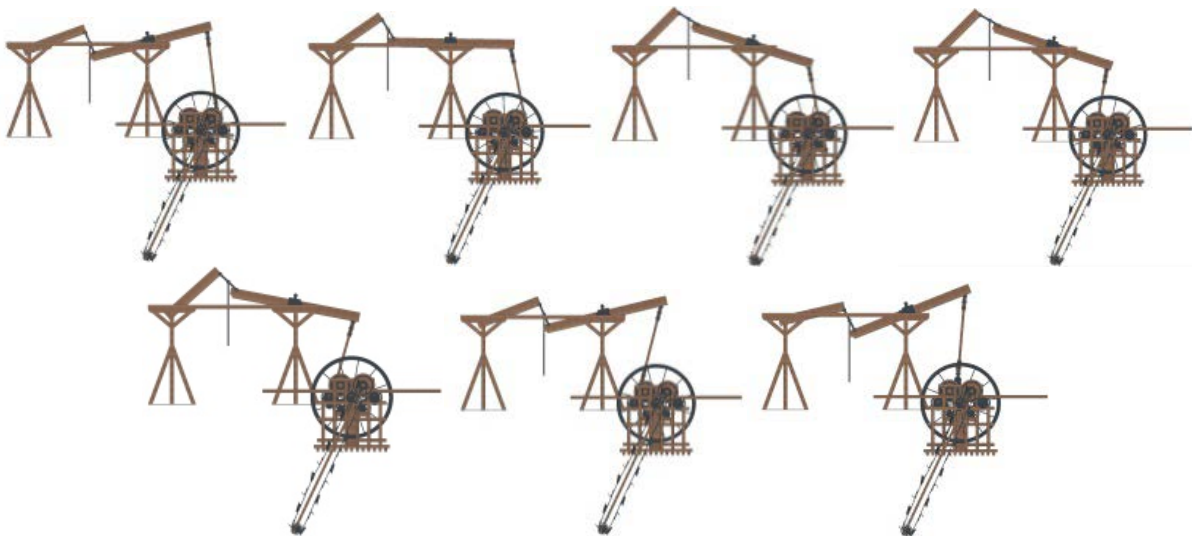


Figura 3.139. Secuencia de movimientos de la draga al moverse el pistón.

El eje principal de la draga tiene a su vez una corona (engranaje recto) en su zona media que engrana con dos coronas auxiliares (6), unidas al bastidor principal del mecanismo (1), y que a su vez engranan con sendas coronas (23) unidas a otros dos ejes.

El eje principal tiene en su zona distal una rueda motriz (20) que transmite el movimiento al tambor de fricción (7) del eje de la draga (24). A su vez, el eje de la draga mueve el piñón motriz de la draga (28), de manera que la relación de vueltas entre el volante de inercia y el piñón motriz es inversamente proporcional a la relación entre los diámetros de la rueda motriz y el tambor de inercia (720 mm/1493 mm), lo que se traduce en que por cada vuelta del volante de inercia el piñón gira media vuelta.

El contacto de estos ejes mediante rueda motriz y tambor de fricción tiene varios objetivos: servir de apoyo al eje que soporta el mecanismo de draga, reducir la inercia del eje y separar con facilidad el eje de la draga y el eje principal provocando la parada de la aquella.

Como se ha comentado anteriormente, el eje principal mueve dos ejes secundarios paralelos (21 y 10) de similares características, y lo hace gracias al juego de engranajes rectos. Se trata de dos ejes simples que poseen en sus extremos una corona (23) que engrana con las coronas auxiliares (6), y una rueda dentada (20) que sirve de apoyo al tambor de fricción.

Entre el eje principal y el eje secundario hay dispuesto un segundo eje (9) semejante al de la draga pero que no transmite movimiento a ningún piñón, y que aparece amarrado con una maroma en las láminas. La finalidad de este eje paralelo es aumentar o disminuir la fricción con las ruedas motrices acelerando o frenando la velocidad de la draga. Cuando se hable del sistema de frenado se volverá a tener protagonismo.

La draga está dispuesta a modo de rosario de cangilones o cubo de limpieza (11). La unión de esos cangilones se realiza a través de una cadena de eslabones de hierro alternos (15, 16) que engranan con el piñón del eje de la draga (28). Este eje tiene unos dientes tronco-piramidales que facilitan el correcto contacto con la cadena, de forma que cada tres eslabones hay dispuesto un cangilón (11) o un gancho de limpieza (12), también de modo alterno. El rosario de draga queda tenso gracias a un doble eje o carril (17) terminado en un piñón secundario de la draga (14) en el extremo del mismo. Asimismo, para que el carril de la draga se desplace fácilmente por el lecho marino, se disponen además dos ruedas metálicas (13) de 750 mm de diámetro a los lados del piñón secundario que no interfieren con el movimiento de la draga. Este sistema ofrecía una ventaja desde el punto de vista mecánico, y es que en el caso de chocar con un elemento que bloquee la draga, dado que el tambor del eje de la draga entra en contacto sólo con la rueda motriz, si deja de girar bruscamente el tambor, la rueda sigue deslizándose al no haber un juego de engranaje entre medias. Así pues, el mecanismo sufre bastante menos ya que no hay posibilidad de rotura.

El siguiente sistema que se analiza es el de las cucharas (Figura 3.136). Se trata de un sistema bastante simple conocido en la época que tenía por finalidad tomar del lecho marino los obstáculos de gran tamaño que podrían dañar la draga.

En la Figura 3.136 se puede apreciar un bastidor de madera en forma de grúa (29) que sostiene en su extremo superior un soporte metálico (40, 41) del que pende una polea de tres canales cubierta por una carcasa metálica (31). Por ella pasa una cuerda (39) en triple de la que pende otra polea (31) de idénticas características. Solidariamente unido al eje de la polea inferior (32) existe una argolla por la que pasan dos cuerdas (36) en direcciones perpendiculares. Estas cuerdas se unen a un mecanismo (35) que tiene por objeto abrir y cerrar la pinza o cuchara (34), a través de un movimiento vertical.

Además, en el bastidor se encuentran dos elementos importantes: por un lado, una pequeña polea metálica (30) que sirve para maniobrar con la cuerda de la polea (39), y por otro, un tambor de madera (38) que recoge una tercera cuerda (37) que sirve para mover la cuchara en el agua. En resumen, la cuerda de la polea serviría para el movimiento de flexión y extensión de la cuchara, y la cuerda del tambor para desplazarla.

Por último, se analiza el sistema de maniobra y elevación de la draga (Figura 3.137). Como se ha señalado anteriormente, la máquina de Betancourt tiene un sistema de propulsión original, ya que no se mueve como otros barcos de vapor mediante palas sino por el propio movimiento del rosario de cangilones de la draga.

Así pues, se conoce que el gobierno del barco era complicado, y para ello, se jugaba independientemente con las velocidades de los cangilones de babor o estribor. Esto se hacía fundamentalmente con los frenos y las ruedas de fricción anteriormente mencionadas.

La cuerda de popa (45) estaba directamente ligada a un enganche (46) que había en el extremo del carril (17). Al tirar de dicha cuerda, el carril con el todo el juego de cangilones se elevaba perdiendo contacto con el lecho marino. Evidentemente, debido a la fuerza que habría que ejercer, obligó a Betancourt a idear un eje (43) para que se pudiera maniobrar de modo más sencillo. Dicho eje para la elevación de la draga gira sobre dos cojinetes (44) para ofrecer la menor resistencia y conservar siempre la posición. El cojinete exterior estaba colocado sobre la borda del barco y el interior sobre una pequeña base (42) para que quedaran a la misma altura.

Por último, el sistema de control de velocidad de la draga se ejercía por medio de dos barras (49) (Figuras 3.140 a 3.142). Estas barras, en cuyo extremo había un rodillo metálico (47), funcionaban a modo de palanca. Al empujarlas hacia abajo el rodillo metálico de la palanca entraba en contacto con el eje de fricción (9), aquel cuyo movimiento entorpecía la maroma, o con el eje de la draga (24). Por lo tanto, ese contacto levanta el tambor de fricción de las ruedas motrices, por lo que el eje inmediatamente deja de rodar. Si el que se levanta es el tambor del eje de fricción el cangilón se acelera, mientras que si el que se levanta es el eje de la draga, ésta se para inmediatamente. Así pues, mediante cuatro operarios que manipulan las cuatro barras, es como se gobernaba el barco.

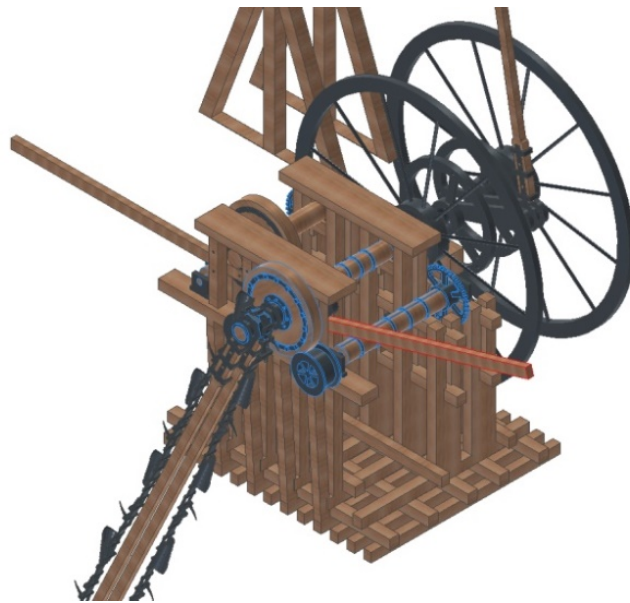


Figura 3.140. Perspectiva axonométrica con palanca de trabajo levantada en posición de trabajo.

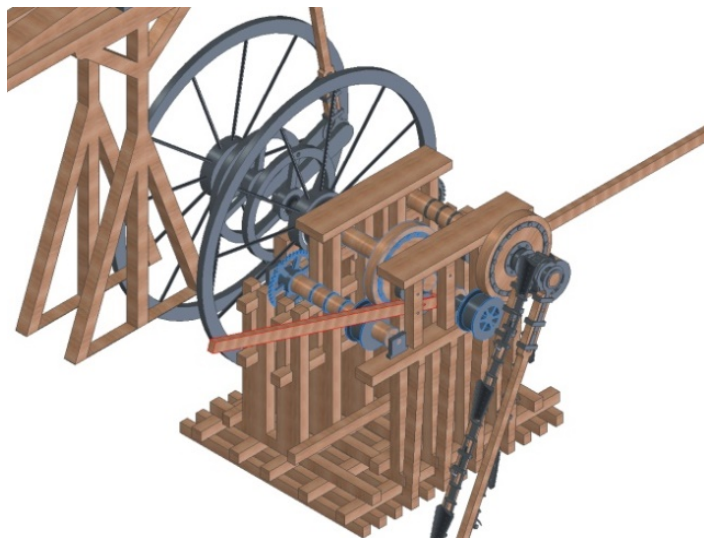


Figura 3.141. Perspectiva axonométrica con palanca de frenado levantada en posición de detención.

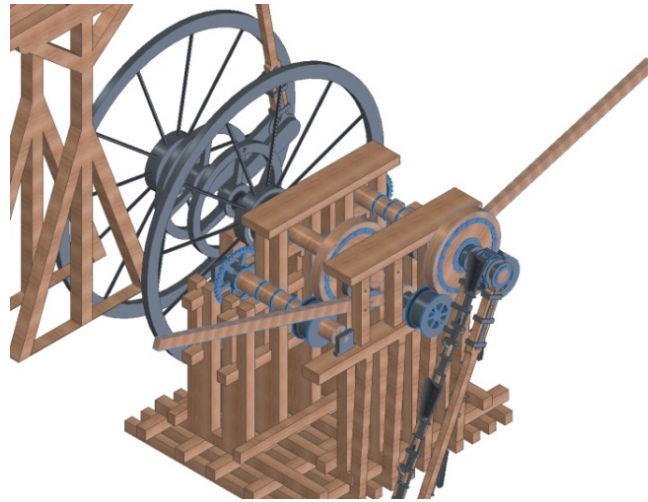


Figura 3.142. Perspectiva axonométrica con ambas palancas levantadas para ralentizar el movimiento.

3.6.2.2. Modelado del barco y elementos impulsores

A diferencia de otras dragas que ya existían en la época (por ejemplo, la draga de Evans puesta en marcha en EE.UU. en 1805), la draga de Agustín de Betancourt estaba montada sobre un barco, y esto lo hacía del todo original.

La primera estructura que hay que modelar para la máquina de dragar es un barco. Betancourt es consciente de que las dimensiones del barco no son especialmente determinantes a la hora de instalar su máquina, por lo que no especifica su manga, calado y eslora. Para la modelización del barco se ha tomado el más parecido al mostrado en las láminas, aunque un barco de estas características (sin quilla, timón y con un casco tan plano), dificulta mucho la navegabilidad y gobernabilidad del mismo (Figura 3.143). Se trata de una barcaza de 33,60 m de eslora, 9,26 m de manga y un puntal de 3,6 m.

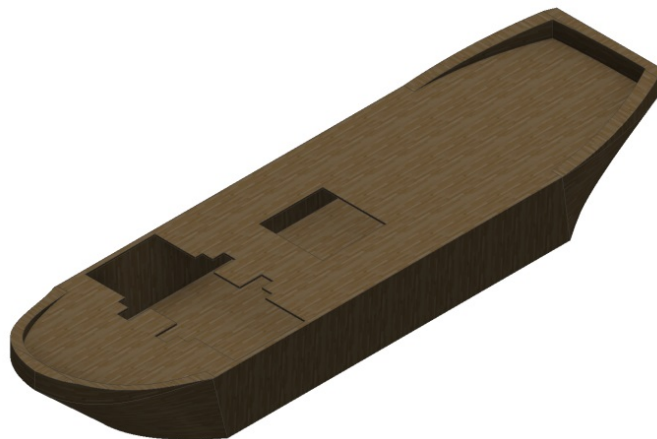


Figura 3.143. Perspectiva axonométrica del barco.

Como se puede apreciar, la cubierta tiene practicados orificios, para situar en ellos una serie de elementos estructurales tanto de la draga como de los elementos impulsores.

Como se ha dicho anteriormente, se han modelado los elementos impulsores, chimeneas, máquina de vapor, calderines, retornos, estructuras soporte, etc..., pero para el objetivo del estudio, donde los protagonistas son otros elementos, se ha optado por modelarlos a modo ilustrativo, por lo que no se va a hacer un análisis a fondo de sus partes y dimensiones. Así pues, se ha modelado una caldera de madera de la que sale una chimenea y el conducto de vapor de agua en forma de L, y para sostener la chimenea principal, Betancourt realiza una estructura

metálica a modo de soporte. También se observa el cilindro de doble efecto del que sale el émbolo en forma de T que conecta con la unión entre balancines, y por último, se modelan la chimenea de refrigeración y un retorno en cobre para aprovechar el agua condensada en dicha torre. El resto de elementos no se modela (Figura 3.144).

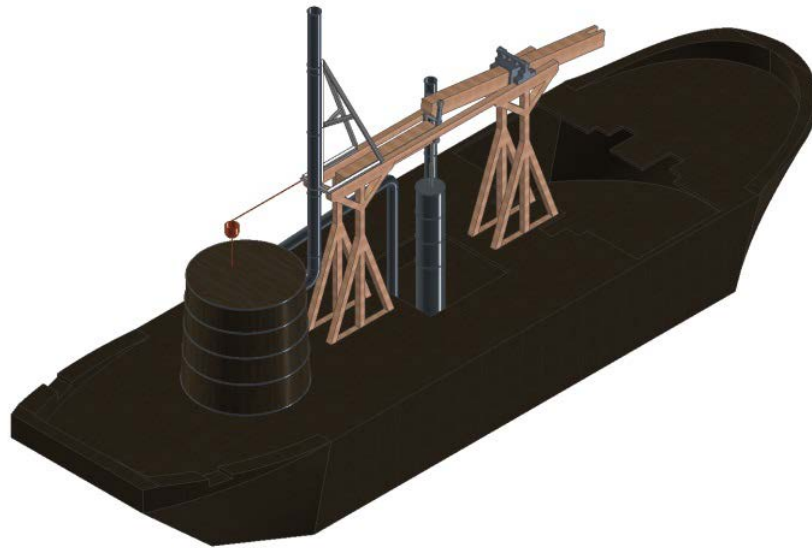


Figura 3.144. Perspectiva axonométrica con los elementos impulsores del sistema de draga.

3.6.2.3. Modelado de la estructura balancines-cigüeñal

El primer sistema a modelizar, sin el cual no puede entenderse cómo llega el impulso de movimiento desde el eje del cilindro hasta los ejes de la draga, es el sistema balancines-cigüeñal, y que presenta una serie de complejidades en su diseño que es necesario afrontar para que la estructura posteriormente trabaje de manera correcta.

El primer elemento a modelar es el soporte de los balancines. Este soporte en madera es una especie de pórtico en caballete cuya misión es sostener el peso de los balancines y del soporte metálico de la chimenea (Figura 3.145).



Figura 3.145. Perspectiva axonométrica del soporte de los balancines.

El siguiente elemento es el apoyo del eje del balancín principal. Este balancín, debido a su peso, tiene un cojinete metálico que alberga su eje. Este apoyo tiene un diámetro interior de 150 mm y la anchura igual a la de la viga soporte sobre la que se sitúa (Figura 3.146).

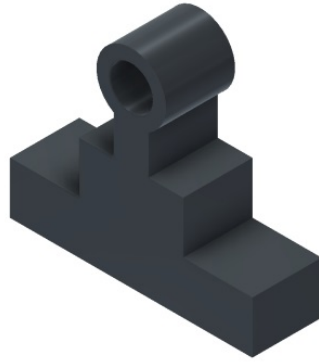


Figura 3.146. Perspectiva axonométrica del apoyo del eje del balancín.

El siguiente elemento, quizás el más importante, es el balancín principal. Se trata de una viga de 8,28 m de longitud y sección cuadrada de 600 mm de lado. En el medio tiene adosado un eje metálico abrazado por un cerco de sección cuadrada, y en sus extremos se sitúan dos ejes de madera, uno con el que se une al eje del cilindro y otro con el que se une a la biela (Figura 3.147). Este elemento, al estar formado por dos elementos independientes, se modela por separado y después se ensamblan juntos. Al importar el ensamblaje de este balancín al ensamblaje general se comporta como una pieza única, aunque con propiedades materiales propias.

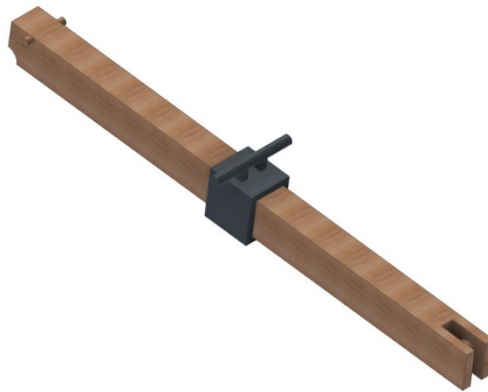


Figura 3.147. Perspectiva axonométrica del balancín principal.

El balancín secundario tiene algunas funciones en el proceso de funcionamiento de la máquina de vapor, pero condiciona el funcionamiento del balancín principal. Presenta una longitud de 4,32 m y las mismas dimensiones de base que la viga del balancín principal. En sus extremos hay un eje de madera para unirse al soporte y otro de menores dimensiones para hacerlo con el eje del pistón del cilindro (Figura 3.148).



Figura 3.148. Perspectiva axonométrica del balancín secundario.

La unión entre balancines y el eje del pistón del cilindro es muy importante. Esta unión metálica presenta una geometría muy especial, con tres taladros, dos en sus extremos y uno en su parte

media, y además cada uno de ellos debe acoplarse perfectamente con el eje al que está destinado (Figura 3.149).



Figura 3.149. Perspectiva axonométrica de la unión entre balancines y el eje del pistón del cilindro.

La biela, siguiente elemento a modelar, está formada por un listón de madera de sección rectangular (120 x 150 mm) y 6 m de longitud, pero presentando en los extremos unas dimensiones de la base algo mayores (120 x 240 mm). En estas partes hay adosadas a las caras dos elementos metálicos con la geometría indicada para acoplarse perfectamente tanto al eje del balancín como al del cigüeñal. Para unir estos elementos metálicos al listón se usan tres cercos de hierro que impiden su desplazamiento (Figura 3.150). Como en el caso del balancín ha sido necesario crear un ensamblaje de la pieza biela que incluye elementos metálicos y no metálicos.



Figura 3.150. Perspectiva axonométrica de la biela.

El cigüeñal metálico está formado por dos ruedas de enormes dimensiones unidas por una zona intermedia donde el eje está desplazado respecto al centro, a modo de satélite. Las ruedas metálicas de 12 radios cada una, presentan un diámetro de 5,20 m y se trata de una estructura con una anchura total de 2,59 m. El centro del satélite tiene una excentricidad de 1,35 m y en ese punto el eje tiene un diámetro de 300 mm. La Figura 3.151 muestra más claramente su geometría. Este elemento es el que transforma un movimiento de balanceo en otro giratorio.



Figura 3.151. Perspectiva axonométrica del cigüeñal.

El último elemento a modelar es el apoyo del cigüeñal. El eje central del cigüeñal tiene un diámetro de 160 mm, por lo que el apoyo, que debe ser resistente y por ello es metálico, tiene un cojinete con la misma geometría (Figura 3.152).

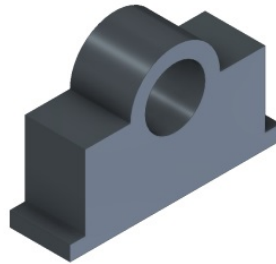


Figura 3.152. Perspectiva axonométrica del apoyo.

3.6.2.4. Modelado de la estructura de la draga

La estructura de la draga es el elemento donde el ingeniero canario desplegó todo su ingenio demostrando su dominio sobre la mecánica.

En primer lugar, se debe modelar el bastidor donde va todo el mecanismo transmisor del movimiento. La estructura en madera va a recibir todo el peso tanto de los ejes como de la propia draga, por lo que debe ser una estructura robusta. Además, la estructura debe estar bien instalada respecto a la bodega, siendo geoméricamente compatible con las paredes del barco. Con estos datos, y sabiendo que la estructura alberga cinco ejes, Betancourt diseña el soporte de la transmisión de la draga (Figura 3.153).

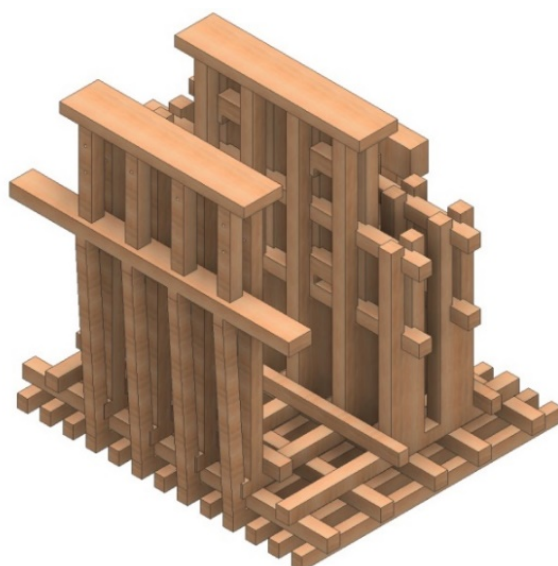


Figura 3.153. Perspectiva axonométrica del soporte de la transmisión de la draga.

Dicho soporte no necesita clavos ya que las estructuras de madera se cruzan unas con otras entrelazando en un conjunto perfectamente compacto, como se puede apreciar en las Figuras 3.154 y 3.155.

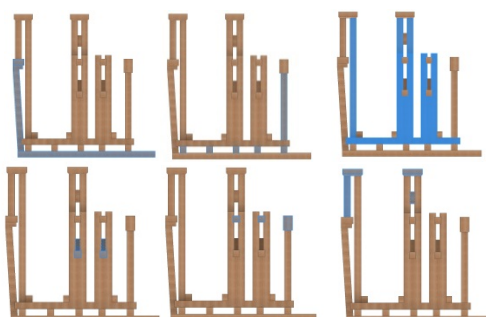


Figura 3.154. Vista lateral del soporte de la transmisión: secuencia de montaje.

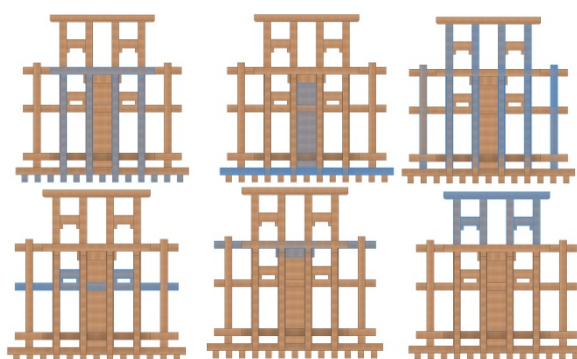


Figura 3.155. Vista de alzado del soporte de la transmisión: secuencia de montaje.

Los elementos a modelar del sistema son los cinco ejes motrices de la draga. Todos ellos presentan cierta analogía y tienen una base común, pero tienen elementos propios.

El eje principal transmite el movimiento desde el volante de inercia al resto de ejes y coronas (Figura 3.156). Está compuesto por una viga de madera de sección circular de 400 mm de diámetro y una longitud de 3.115 mm, que tiene una hendidura lateral que permite ajustar los distintos elementos. Además, presenta una corona recta de 38 dientes y 1 m de diámetro y dos ruedas motrices en el extremo opuesto a la corona. Éstas presentan un diámetro de 720 mm y la anchura necesaria para acoplarse perfectamente a los tambores de fricción de los ejes restantes.



Figura 3.156. Perspectiva axonométrica del eje principal.

Todos los ejes de transmisión tienen elementos metálicos y no metálicos. Evidentemente, este eje funciona como una pieza única, pero realmente debe modelarse cada pieza de modo independiente. Una vez modelados independientemente se ensamblan aparte, y se importan al ensamblaje general como una única pieza, pero manteniendo las propiedades físicas propias. Este proceso de modelado ha sido el que se ha seguido en todos los ejes.

El eje de la draga transmite el movimiento desde el eje principal a la draga (Figura 3.157). Está compuesto por una viga de madera de sección circular de 400 mm de diámetro y una longitud de 3,33 m, y en uno de los lados presenta un tambor de fricción de grandes dimensiones (1.493 mm de diámetro y una anchura de 200 mm). En el extremo del mismo lado, hay un piñón hexagonal en el que aparece en caras alternas, el relieve del tronco de una pirámide de base rectangular cuyas dos caras opuestas son paralelas. El hexágono regular tiene 240 mm de lado y el tronco de pirámide tiene una altura de 60 mm, siendo la longitud de sus bases de 120 mm y 180 mm. La anchura del piñón es de 255 mm y la del tronco de pirámide mide 120 mm. Además, estas dimensiones determinan la longitud de los eslabones.



Figura 3.157. Perspectiva axonométrica del eje de la draga.

El eje de fricción obstaculiza el movimiento del eje principal (Figura 3.158). Está compuesto también por una viga de madera de sección circular de 400 mm de diámetro y una longitud de 2.000 mm, y en uno de los lados, presenta un tambor de inercia de dimensiones iguales que el del eje de la draga.



Figura 3.158. Perspectiva axonométrica del eje de fricción.

El primero de los ejes auxiliares (Figura 3.159) transmite el movimiento desde una corona auxiliar, impulsada por el eje principal hasta el tambor de fricción del eje de fricción, y tiene la función de servir de apoyo a dicho tambor. Está compuesto por una viga de madera de sección circular de 400 mm de diámetro y una longitud de 2,38 m. Asimismo, la viga tiene una hendidura lateral que permite ajustar los distintos elementos, al igual que ocurre con la viga principal. Además, en su extremo tiene una corona recta de 38 dientes y 1 m de diámetro, y una rueda motriz en el lado opuesto a la corona. La rueda presenta un diámetro de 720 mm, y la anchura necesaria para acoplarse perfectamente al tambor de fricción mencionado.



Figura 3.159. Perspectiva axonométrica del eje auxiliar 1.

El segundo eje auxiliar (Figura 3.160) transmite el movimiento desde una corona auxiliar, impulsada por el eje principal, hasta el tambor de fricción del eje de la draga, y al igual que el caso anterior, tiene la función de servir de apoyo a dicho tambor. Está compuesto por una viga de madera de sección circular de 400 mm de diámetro y una longitud de 2,22 m, presentando también una hendidura lateral. En su extremo tiene una corona recta de 38 dientes y 1 m de diámetro y en el opuesto, una rueda motriz de características y función igual al resto de ruedas motrices.



Figura 3.160. Perspectiva axonométrica del eje auxiliar 2.

Tras modelar cada uno de los ejes queda por modelar dos coronas auxiliares, de similares características a las vistas en los ejes y los apoyos de los ejes, que son metálicos y que son imprescindibles para el correcto funcionamiento del mecanismo de transmisión (Figura 3.161).

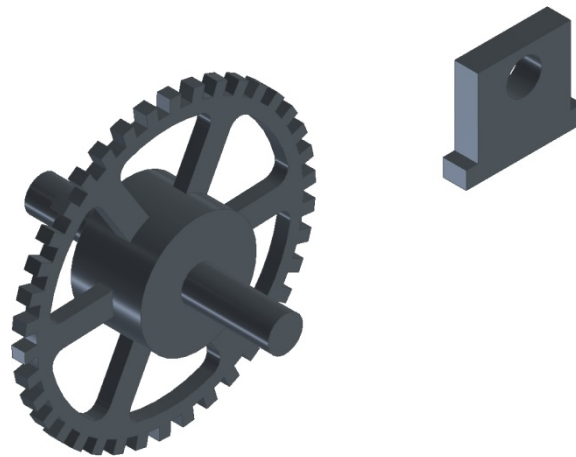


Figura 3.161. Perspectiva axonométrica de la corona externa y de un apoyo tipo.

Finalizado el proceso de modelado de todos los elementos del sistema de transmisión del movimiento, es el turno de modelar los componentes de la draga.

El primer elemento de la draga ya está modelado, y es el piñón del eje de la draga a partir del cual van a moverse todos los elementos de la misma. Asimismo, a la derecha e izquierda del piñón aparecen dos ejes soportes que se han denominado carriles (Figura 3.162).



Figura 3.162. Perspectiva axonométrica del carril.

Cada carril está formado por un listón de madera de base rectangular (120 x 150 mm) y 10,05 m de longitud. En el extremo más cercano al piñón, las dimensiones de la base son algo mayores (120 x 240 mm), y adosadas a las caras, se encuentran dos elementos metálicos con la geometría indicada para acoplarse perfectamente al eje de la draga. Para unir estos dos elementos metálicos a la barra se usan tres cercos de hierro que impiden su desplazamiento, y en el extremo opuesto hay que practicar un taladro para acoger la rueda de apoyo del rosario de cangilones. De nuevo, al existir piezas metálicas y no metálicas, se modeliza aparte formando un conjunto ensamblado.

A continuación, se modelan las ruedas y el eje metálicos que irán en la parte inferior del carril (Figura 3.163). Estas ruedas, unidas a su eje, deben ser de unas dimensiones inferiores a la distancia de ataque de los cangilones y ganchos de la draga, ya que de ser mayor la dragadora no llegaría a tocar el lecho marino nunca. En este estudio, se ha tomado un diámetro de rueda de 750 mm.

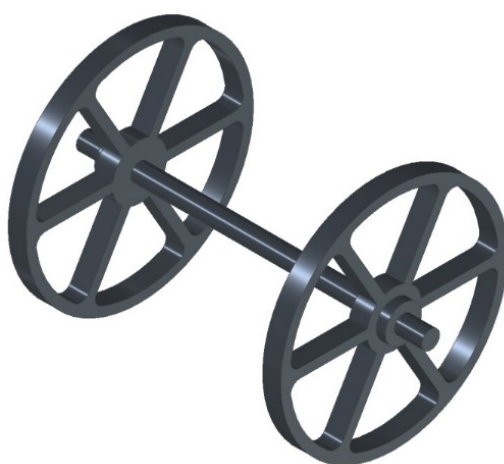


Figura 3.163. Perspectiva axonométrica de las ruedas y del eje.

Asimismo, el eje que se acaba de modelizar es común para el piñón inferior de la draga, y éste es de geometría semejante al piñón superior salvo por dos diferencias: en el piñón inferior no hay relieve en las caras, y además, se le practican dos protecciones laterales para evitar que algún objeto pueda bloquearlo (Figura 3.164).

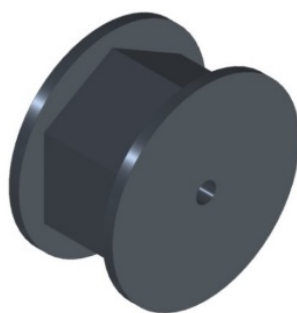


Figura 3.164. Perspectiva axonométrica del piñón inferior.

Así pues, faltaría por modelizar los eslabones de la cadena con los instrumentos de draga propiamente dicho. Dichos eslabones presentan un paso entre sus ejes de 270 mm, y existen dos modelos (macho y hembra), que van alternando con el fin de que el piñón pueda engranar perfectamente con la cadena formada. Los eslabones son metálicos y tienen una geometría que les permite acoplarse perfectamente. El eslabón macho tiene unas conexiones mayores que las del agujero del eslabón hembra con el fin de poder acoplar los instrumentos de draga (Figura 3.165).

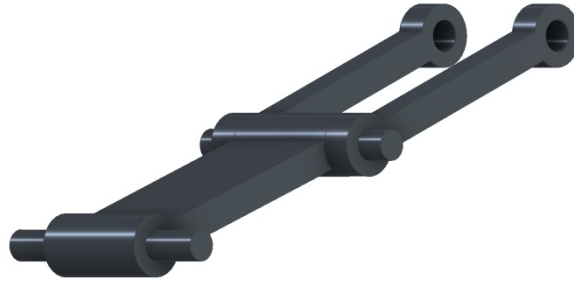


Figura 3.165. Vista axonométrica de un par de eslabones (macho inferior y hembra superior).

Asimismo, los instrumentos de draga son dos: los cangilones o cubos de limpieza y los ganchos. Estos se disponen de forma alterna sobre los eslabones macho dejando siempre un eslabón macho libre.

El cangilón o cubo tiene una geometría muy particular diseñada por Betancourt para tratar de captar la mayor cantidad de tierra y lodo del lecho marino. Son metálicos y están horadados para evacuar el agua y disminuir el peso efectivo. El borde superior tiene forma de punta para que trabaje como una pala al atacar el lecho marino. Sin embargo, el gancho es una sencilla herramienta en forma de pico al que se ha provisto de la geometría necesaria para insertarlo la cadena de cangilones (Figura 3.166).

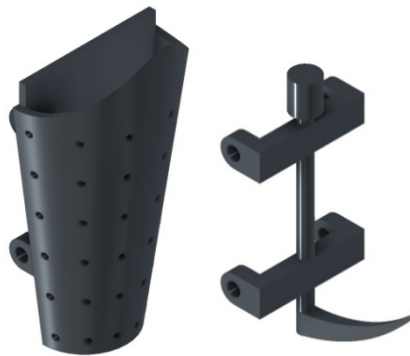


Figura 3.166. Perspectiva axonométrica del instrumental de draga (cangilón y gancho).

3.6.2.5. Modelado del sistema de cuchara

El sistema de cuchara es un sencillo sistema que tiene como finalidad eliminar del lecho marino cualquier elemento que pueda entorpecer el trabajo de la draga y que, por ser de un tamaño adecuado, se puede retirar con un sistema de poleas.

Al igual que se ha hecho con el sistema de la draga, el primer elemento a modelar es el bastidor, el cual viene condicionado por las restricciones geométricas que tiene el barco (Figura 3.167). El bastidor de madera se debe diseñar con la finalidad de ser capaz de soportar cargas elevadas suspendidas en el aire. Con estos datos, Betancourt toma como bastidor del sistema, una estructura en caballete que es el soporte de una grúa estática.



Figura 3.167. Perspectiva axonométrica del bastidor o soporte del sistema de cuchara.

Al igual que en el soporte anteriormente mencionado, éste no necesita clavos ya que la propia geometría hace que el conjunto sea compacto, pero sí debe ser correctamente fijado (atornillado) en la cubierta del barco, para evitar futuros problemas estructurales. Su correcto montaje se puede ver en las Figuras 3.168 y 3.169.

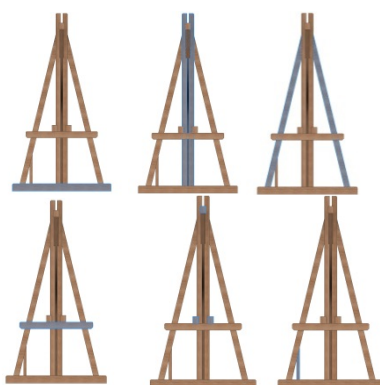


Figura 3.168. Vista de alzado del soporte de la cuchara: secuencia de montaje.

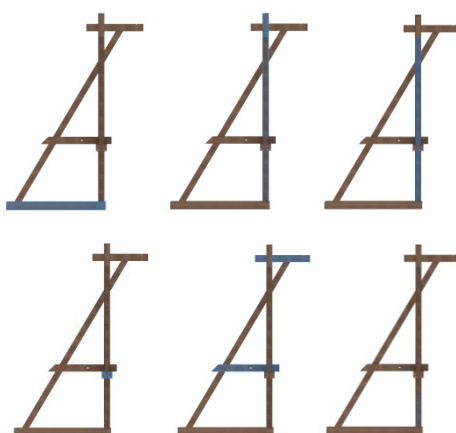


Figura 3.169. Vista de perfil del soporte de la cuchara: secuencia de montaje.

La estructura soporte tiene dos tambores que facilitan la recogida de las cuerdas y que actúan como tambor o como polea. La primera de ellas, es metálica y está implicada en la maniobra de

ascenso o descenso de las poleas. Se trata de un rodillo metálico con un diámetro de 320 mm y que admite cuerdas de hasta 160 mm de diámetro (Figura 3.170).

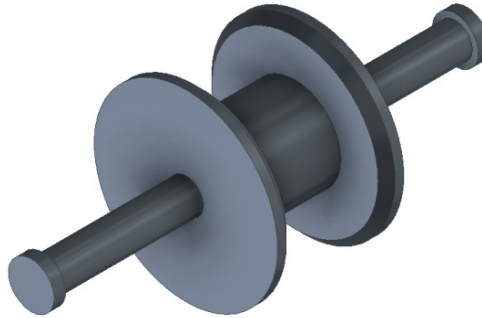


Figura 3.170. Perspectiva axonométrica del rodillo de acción de la polea.

El segundo es un tambor que tiene como misión hacer de bobina para la cuerda de posicionado de la cuchara, y que presenta un diámetro de 220 mm (Figura 3.171). El gobierno de la cuerda de posicionamiento de la cuchara se hace a mano, pero el otro extremo está enrollado sobre este tambor con el fin de dar más o menos capacidad de movimiento a la cuchara.



Figura 3.171. Perspectiva axonométrica del tambor de recogida de la cuerda de posicionamiento.

El siguiente elemento a modelar es la unión entre el bastidor y el gancho de poleas (Figura 3.172). Esta pieza metálica está compuesta por un eje transversal y una pieza en forma de U. El redondo de hierro es de 40mm de espesor, y su finalidad es que pueda engancharse el soporte metálico de la polea.



Figura 3.172. Perspectiva axonométrica de la unión entre bastidor y el gancho de la polea.

El soporte metálico de la polea superior tiene como objeto conectar el soporte (a través de la unión metálica) y el eje de la polea, de ahí su geometría específica (Figura 3.173). Por un lado, la parte superior debe engancharse con la unión metálica, de ahí la forma de gancho; por otro lado,

debe admitir el eje de la polea para poder sostenerla (de ahí, los dos taladros en la zona media), y por último, debe admitir ser manipulado a través de una cuerda, y por ello el seno que hay en la zona inferior. Como en la pieza anterior, está fabricada con un redondo de hierro de 40mm.



Figura 3.173. Perspectiva axonométrica del soporte metálico de la polea superior.

La polea es una polea de tres canales de grandes dimensiones, ya que debe hacer frente a importantes cargas (Figura 3.174). El diámetro interno de la polea es de 200 mm y tiene un eje de 40 mm de diámetro y 480 mm de largo. Exteriormente está cubierta por una carcasa metálica cuya función es aislarla del medio, pero los tres elementos hay que modelarlos independientemente, aunque formen un conjunto.

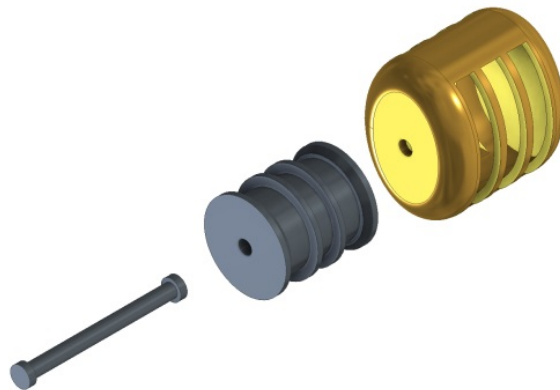


Figura 3.174. Perspectiva estallada de la polea.

Por la polea superior, pasa una cuerda que también pasa por la polea inferior, de idénticas características, y al tener tres canales, la misma cuerda debe pasar tres veces por dichos canales. La cuerda empleada en la simulación es de nylon, aunque en la época se utilizaría otra de material vegetal. El diámetro de la misma es de 40 mm, aunque la polea admite cuerdas de hasta 55 mm.

La modelización de cuerdas en Inventor Professional es una de las asignaturas pendientes del software ya que no mantiene las propiedades dinámicas de la misma. Para realizar el modelado es necesario calcular la trayectoria de la cuerda, dibujarla y hacer un barrido con una circunferencia del diámetro deseado.

La siguiente pieza a modelar es el soporte metálico de la polea inferior, que es semejante al de la polea superior, pero evidentemente, sin gancho que lo suspenda (Figura 3.175).



Figura 3.175. Perspectiva axonométrica del soporte metálico de la polea inferior.

Por último, queda por modelizar el mecanismo de cuchara. El mecanismo está formado básicamente por tres elementos. Por un lado, un soporte de madera a modo de viga vertical de sección cuadrada de 200 mm de lado y de 2,50 m de longitud, cuyos extremos están cortados de forma piramidal (Figura 3.176). El extremo superior está rematado con una pieza metálica terminada en una argolla encastrada por la geometría de la viga de madera. El extremo inferior está rematado por dos piezas metálicas a modo de brazos terminados en dos sectores circulares perforados para una finalidad determinada. Como en el caso de los ejes, el soporte de la polea tiene piezas metálicas y no metálicas que se modelizan independientemente, y posteriormente, se ensamblan formando un único conjunto ensamblado.



Figura 3.176. Perspectiva axonométrica de la viga soporte de la cuchara.

La siguiente pieza es un ingenioso mecanismo que va a facilitar la flexión y extensión de la cuchara (Figura 3.177). Se trata de una pieza metálica cuadrada por cuyo seno pasa la viga soporte. Esta pieza tiene cuatro pasantes por los que pasan dos cuerdas que vienen del soporte metálico de la polea inferior. Cuando las dos cuerdas tiran, accionadas por las poleas, la pieza metálica asciende por la viga de madera.

La parte inferior de la pieza metálica tiene también cuatro pasantes, situados dos a dos, por los que entrarán en contacto las cucharas o tenazas de la draga.

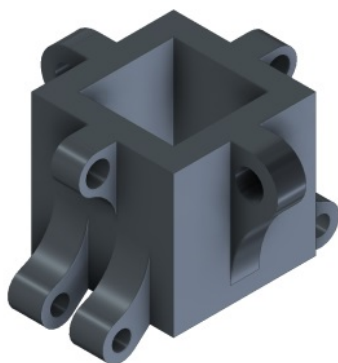


Figura 3.177. Perspectiva axonométrica de la pieza metálica para la flexión y extensión de la cuchara.

Por último, hay que modelar las dos piezas de la cuchara que actúa a modo de pinza. Realmente se trata de una cuchara en uno de los lados, y una cuchara doble, en el otro. Por lo tanto, son piezas distintas, y su geometría es muy complicada.

La Figura 3.178 muestran cada una de las piezas por separado con los ejes que las unen a la pieza antes citada y con la viga soporte.



Figura 3.178. Perspectiva axonométrica de cada cuchara.

Cada una tiene un eje superior que la conecta con la pieza metálica, y una pieza superior a modo de antebrazo de similares características para las dos cucharas. La conexión entre la pieza superior y la inferior es un segundo eje horizontal. La pieza inferior presenta forma de interrogante, siendo simple en una de ellas y doble en la otra. Esta pieza está taladrada en su zona media para que pueda pasar otro pequeño eje (el tercero) que las une entre sí, y con el extremo inferior de la viga soporte de las cucharas. Esta ingeniosa cuchara tiene la facultad de cerrarse al tirar de la polea, pero para abrirla, se tiene que sacar del agua y hacerlo de forma manual.

3.6.2.6. Modelado del sistema de maniobra y elevación

El último sistema a modelar es el de maniobra y elevación. Este sistema es mucho más sencillo que los anteriores y sirve solamente para dotar de maniobrabilidad a la embarcación, y para evitar que la draga tenga algún percance al chocar con algún elemento no deseado.

El primer elemento que se va a modelar es la base de popa sobre el que se establece el cojinete interior de cada eje para el alzado de la draga.

Está constituida por dos superficies cuadradas elevada dos alturas iguales de 500 mm, la primera de 4 m de lado y la segunda de 3 m. Con esto se consigue elevar el cojinete un metro por encima de la cubierta (Figura 3.179).

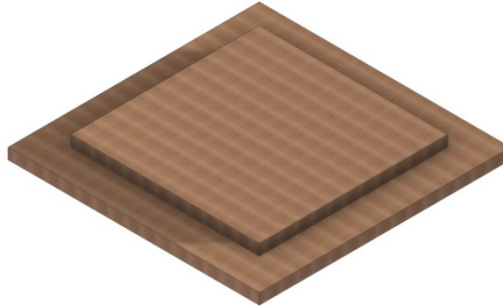


Figura 3.179. Perspectiva axonométrica de la base de popa para el apoyo de los cojinetes interiores.

El eje de parada es un eje de grandes dimensiones que requiere unos cojinetes que le faciliten tanto la rodadura como su correcto posicionamiento (Figura 3.180). Los cojinetes son cuatro y su seno es de 320 mm de diámetro, estando fabricados en hierro y atornillados a la base o la barandilla del barco donde tienen un rebaje para su instalación.

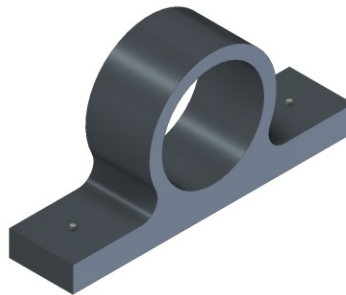


Figura 3.180. Perspectiva axonométrica del cojinete.

Los ejes de alzado de la draga son dos, midiendo 5.225 mm cada uno y con un diámetro máximo en su zona central de 460 mm. La zona de diámetro máximo es la comprendida entre los dos cojinetes, y en la parte central, tiene practicados dos taladros rectangulares para facilitar la maniobra de elevación de la draga o para fijarla a una determinada profundidad usando alguna barra destinada a este fin (Figura 3.181).

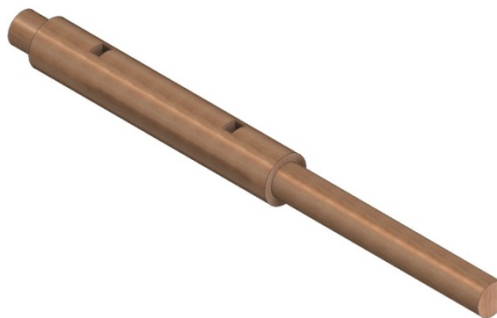


Figura 3.181. Perspectiva axonométrica del eje para la elevación de la draga.

En el extremo del carril, se deben situar dos argollas atornilladas a modo de enganche que sirvan para tirar de la draga cuando sea necesario, presentando un seno de 50 mm y un diámetro de

contorno de 10 mm (Figura 3.182). Para su modelado hay que definir la curva buscada y hacer el barrido de la circunferencia deseada.



Figura 3.182. Perspectiva axonométrica de las argollas de elevación de la draga con su cuerda.

La barra de maniobra está compuesta por dos elementos, un listón rectangular y un rodamiento, situado en uno de los extremos (Figura 3.183). El listón, de sección rectangular de 200 x 120 mm, presenta una longitud de 5.200 mm, y el rodamiento tiene 400 mm de diámetro y 80 mm de ancho. Además, la barra tiene practicado un taladro pasante que permite la entrada de un eje. La distancia del taladro tiene que ser tal que cuando la barra esté en posición horizontal, el rodamiento sea tangente al eje que se desea detener, ya sea el de la draga o el de fricción.



Figura 3.183. Perspectiva axonométrica de la barra de maniobra.

La última pieza por modelar, realmente ya usada en la barra de parada, son los rodillos de los ejes de maniobra (el de la draga o el de fricción). Estos rodamientos facilitan la subida y bajada de dichos ejes cuando la barra los levanta del sitio, evitando que el eje en movimiento toque la estructura soporte, lo que podría llegar a dañarla por abrasión. Las dimensiones de dichos rodamientos son similares a los ya citados (Figura 3.184).



Figura 3.184. Perspectiva axonométrica de un rodillo.

3.6.2.7. Ensamblaje final

El ensamblaje final es determinante para que el conjunto del mecanismo funcione correctamente y posteriormente pueda utilizarse para la simulación de los movimientos o para el análisis estático. Por lo tanto, es imprescindible guardar el orden lógico de la construcción.

Por otro lado, para lograr cierta unidad en el conjunto, se va a dividir el ensamblaje conforme a los sistemas anteriormente presentados.

En primer lugar, se van a colocar sobre el barco los elementos propulsores que son los que van a condicionar el espacio disponible para el resto de sistemas. Así pues, se fija en primer lugar la caldera en la cubierta. Para ello se empotra su base en el lugar correspondiente impidiendo cualquier movimiento, y a continuación las dos chimeneas. Una junto a la propia caldera, del modo más centrado posible, empotrando también la boca de entrada en su sitio, y otra, la chimenea de refrigeración, situándola en el hueco central del barco que conecta con la bodega. Para empotrar dichos elementos simplemente se hace de forma tangencial a las dos superficies y con una restricción respecto al suelo, de modo que no tienen ningún grado de libertad.

El siguiente elemento a situar, no es propiamente un elemento propulsor, pero sirve de apoyo a estos. Así pues, el soporte del balancín es necesario ponerlo en su lugar ya que contiene la estructura que hace que la gran chimenea de la caldera permanezca en su sitio. Se coloca alineado con el borde del orificio cuadrado del centro de la cubierta, de modo equidistante a sus dos lados. Por lo tanto, también se eligen tres restricciones de movimiento para fijarlo. Primero de oposición respecto a la cubierta, y después de alineamiento respecto a dos bordes del agujero.

Como se ha indicado, sobre el soporte es necesario colocar la estructura de sujeción de la chimenea principal, y para ello, también se restringe por oposición la parte inferior de la estructura con la superior del soporte del balancín, y después, por alineación con el borde de la estructura del balancín, quedando perfectamente empotrado ya que las dimensiones son las mismas.

A continuación, hay que colocar la tubería de retorno y el gran cilindro que mueve toda la maquinaria. De nuevo su colocación es muy sencilla, pues el cilindro está situado en el centro del agujero cuadrado, restringiéndose por oposición el fondo del cilindro con el fondo de la bodega del barco y alineándose por restricción tangente a los bordes del cuadrado. La tubería de retorno es aún más sencilla, ya que hay un agujero practicado en la caldera para alojarlo, por lo que, con una restricción de inserción y definiendo una distancia de los bordes queda con un solo grado de libertad. Para fijarla del todo hay que fijar el extremo opuesto con una restricción por oposición al suelo de la bodega.

La tubería de cobre del agua condensada y su vaso de readmisión a la caldera se fijan también con una restricción de inserción más otra de oposición del extremo contrario a una superficie contraria. Por último, queda por ensamblar el pistón del cilindro que se junta con la unión de balancines. Para su correcto ensamblaje, este elemento debe unirse una vez ensamblados los balancines y su unión.

Terminados de ensamblar los elementos propulsores se ensambla el sistema de draga, que es el más complicado.

Como se ha señalado, en primer lugar, hay que ensamblar los balancines. Así pues, sobre el apoyo más cercano a la popa del barco, en la parte alta del soporte, se colocan dos piezas metálicas que son realmente quienes soportan el eje del balancín. Cada pieza se empotra sobre ese lugar usando restricciones de alineación con los bordes.

El siguiente paso es ensamblar el eje del balancín principal. Esta pieza está ya ensamblada con el balancín por lo que únicamente hay que ensamblarla por restricción de inserción en el agujero de la unión de balancines. Esto le proporciona a la viga del balancín libertad para girar, por lo que se balancea al subir o bajar el pistón.

El balancín secundario tiene por geometría dos pernos que le permiten insertar el extremo más cercano a la proa con los taladros del soporte. Por ello, simplemente se restringe el movimiento por inserción con dicho agujero, haciendo que esta segunda viga balancee respecto a este eje. El siguiente paso es conseguir que ambos balancines se unan, y para ello, hay que ensamblar la unión metálica de balancines, es decir, dos piezas a modo de barra con tres senos. La pieza se coloca restringiendo el movimiento del seno por inserción en el perno situado en el extremo del balancín principal, y sólo después, en el perno del balancín secundario. Se debe hacer esto utilizando los taladros de los extremos y dejando libre el del medio, ya que así, el movimiento de balanceo de ambas vigas se restringe, siendo uno dependiente del otro, como por otra parte se buscaba.

El movimiento de ambos balancines depende del pistón del que se ha hablado al principio y que se había dejado de lado. El extremo del pistón es una T, y para su correcto ensamblaje, la parte superior se restringe por inserción en el taladro que ha quedado libre, y el otro extremo del eje se restringe por inserción en el agujero del cilindro. De este modo el pistón puede ascender y descender moviendo ambos balancines.

En el otro extremo del balancín principal se ensambla la biela por inserción del taladro de su extremo con el eje del extremo de popa del balancín. De esta forma, la biela puede girar respecto al eje del balancín cuyo movimiento finalmente será un cabeceo (Figura 3.185).

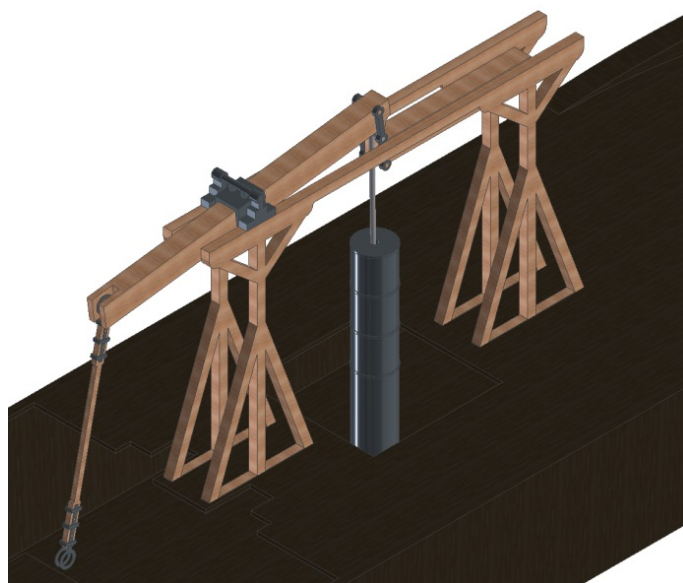


Figura 3.185. Perspectiva axonométrica del ensamblaje de balancines, eje del cilindro y biela.

El siguiente paso es ensamblar la estructura de transmisión de movimiento con ejes y coronas. Así pues, el primer paso es empotrar en su posición los dos bastidores para el soporte de cada draga, una por cada lado. Para ello, de nuevo se utilizará la restricción de oposición con el fondo de la bodega y de alineación con el hueco practicado en la cubierta a tal efecto.

Sobre ese soporte y, en primer lugar, hay que colocar los cojinetes que soportan el gran cigüeñal en la zona más cercana al centro del barco, y se posición un cojinete en el soporte de babor y otro en el de estribor, de modo que el cigüeñal se apoya en ambos soportes. El ensamblaje de los cojinetes es por oposición y alineación restringiendo todos sus movimientos. El cigüeñal, por el

contrario, sólo se ensambla restringiendo por inserción en el seno del cojinete, de modo que pueda rodar con libertad.

Por otro lado, del sistema anterior quedaba por fijar el extremo de la biela libre. Ahora ya se puede restringir ese extremo de la biela insertándolo en el eje planetario del cigüeñal. Con este sencillo ensamblaje se consigue que el movimiento de cabeceo del balancín se transforme en un movimiento de rotación en el cigüeñal.

Para insertar los ejes, previamente se ensamblan los apoyos de los mismos. Los apoyos son un total de diez por soporte, excluyendo el del cigüeñal, y deben colocarse exactamente en su espacio. Su colocación se hace restringiendo su base por oposición y alineando sus bordes con los del espacio en el que van colocados.

Una vez insertados dichos ejes, la correcta colocación de los ejes restantes es más sencilla. El eje principal es una continuidad del eje del cigüeñal, y para que se muevan solidariamente ambos, se inserta el extremo del eje con el extremo del eje cigüeñal oponiendo sus caras. Después se obliga, con una restricción de giro, a que cada vuelta que dé el cigüeñal lo dé también el eje principal. De este modo trabajan solidariamente.

Si el eje principal está en su sitio ya estará insertado en su apoyo. De todos modos, para definir bien los contactos para trabajos futuros, es necesario restringir el movimiento del eje por inserción a dicho agujero también. Esto no impide el movimiento del eje si está correctamente alineado.

En caso de que el software no permita esto, hay que desactivar las restricciones del apoyo, restringir el agujero del apoyo por inserción en el eje principal, y luego hacer que su base se oponga al lugar del soporte donde se encuentra. Pero si no está bien alineado, por problemas en la geometría del soporte, la simulación será imposible.

Los siguientes elementos a ensamblar son las coronas auxiliares. Por un lado, estos elementos se ensamblan restringiendo su movimiento por inserción del eje con el apoyo establecido, y por otro lado, también hay que establecer una restricción de rodadura respecto al eje principal. Cada vuelta que gire éste, la corona auxiliar la gira en sentido contrario. Terminadas las coronas hay que ensamblar los ejes auxiliares. Estos también se restringen respecto a sus apoyos por inserción y a la rodadura respecto a las coronas auxiliares, y de este modo giran en el mismo sentido que el eje principal.

Quedan por ensamblar los dos ejes más importantes. El eje de la draga y el eje de fricción (Figura 3.186). Con estos ejes hay que tener especial cuidado porque no se ensamblan como el resto. Por un lado, se restringe el movimiento por inserción en su apoyo como el resto, pero al contrario de lo que pueda parecer, no hay que someter el giro del tambor de inercia a la rodadura de las ruedas motrices. Este sería el comportamiento habitual cuando se quiere dragar y no se quiere usar el freno del tambor de fricción, pero a veces se puede eliminar el contacto entre elementos usando las barras de parado o de fricción y seguirían funcionando. Por ello, lo único que hay que hacer es “activar los contornos” entre los ejes y las ruedas motrices, ya que, al hacerlo, el software determina si hay contacto entre superficies y actúa en consecuencia.

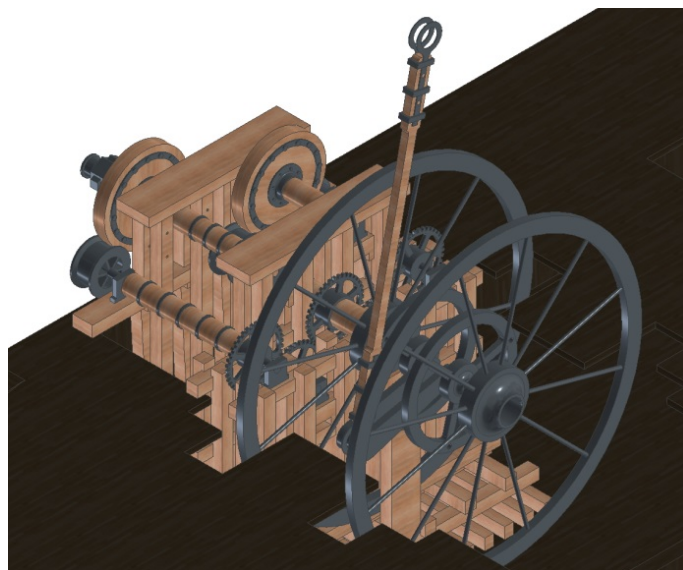


Figura 3.186. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema transmisor.

Llega el momento de afrontar el ensamblaje de la draga. Los elementos propios de la draga tienen un ensamblaje complejo al tratarse de una cadena. De hecho, el rosario de cangilones y ganchos hay que empezar por montarlo aparte para después colocarlo en su sitio. Para saber el número de eslabones a utilizar es necesario conocer la distancia que hay entre los dos piñones de la draga, el superior y el inferior, por lo que el ensamblaje de este grupo debe empezar por aquí.

El ensamblaje del carril no es muy complejo. Se toma el carril por el lado de la argolla y se inserta ésta junto al piñón superior restringiendo el agujero de la argolla por inserción al eje de la draga. Esta operación hay que repetirla del lado opuesto del piñón ya que el carril está formado por dos listones, y hace que los listones queden libres para rotar sobre el eje de la draga.

A continuación, se ensamblan las ruedas inferiores, también por restricción de inserción del eje de las ruedas con los taladros que para tal fin hay en los dos listones. Con esta operación los listones se mueven de manera síncrona y las ruedas giran libremente. Sobre el eje de la rueda se inserta el eje del piñón inferior repitiendo la misma operación, y logrando que el piñón gire libremente sobre el eje de la rueda inferior. El piñón inferior debe quedar entre los dos listones, por lo que al restringir por inserción el eje, hay que procurar alinearlos respecto a uno de los listones.

El siguiente paso a dar es el montaje de la cadena de draga. Como ya se ha advertido previamente, el montaje se realiza alternando un eslabón macho con uno hembra. Esta operación es muy sencilla ya que basta con restringir por inserción el eslabón macho en el pasante de la hembra, eso sí, cuidando de que queden alineados los bordes de los eslabones y no el eje del eslabón macho, pues éste debe sobresalir para dar cabida al resto de elementos. Esta operación hay que repetirla hasta que se complete ligeramente el doble de la distancia entre piñones.

Seguidamente hay que colocar los cangilones y los ganchos usando siempre la restricción por inserción. Ya se ha comentado que estos se colocan sólo en los eslabones machos. Además, es necesario hacerlo de forma alterna y en la dirección correcta, para que las puntas puedan atacar el suelo, pues de otro modo, no extraerían nada del lecho marino. Así pues, la secuencia de montaje sería como sigue: se insertan los dos agujeros de los extremos del cangilón en los ejes de un eslabón y el siguiente eslabón macho se deja libre; posteriormente se insertan los dos pasantes de los extremos del gancho de limpieza, y el siguiente eslabón macho se deja libre.

Debido a esta secuencia el número de eslabones debe ser múltiplo de 4. Se han empleado en el presente estudio 80 eslabones, 40 machos y 40 hembras, además de 10 cangilones y 10 ganchos de limpieza, los mismos que se aprecian en las láminas de la draga del puerto de Kronstadt.

Como se ha dicho con anterioridad, una vez elaborado el rosario de cangilones hay que colocarlo en su posición, siendo un proceso con su complejidad. Se coloca un eslabón hembra en el piñón superior, y para ello, hay que restringir sus movimientos por oposición y alineación en las tres direcciones fijando dicho eslabón al piñón. Acto seguido, hay que bloquear temporalmente el piñón para que no cambie de posición (fijando el elemento), y a continuación, se estira con cuidado la cadena (el proceso es tedioso porque hay que ir bloqueando algunos eslabones y hay que ir de uno en uno). Una vez estirado, cuando ya se tiene próximo el eslabón hembra opuesto al superior, se eliminan las fijaciones de todos los eslabones menos del primero. Seguidamente, se restringe el movimiento del último eslabón como se ha hecho con el primero, quedando perfectamente situado en torno al piñón inferior, y de nuevo, este último eslabón se fija. Fijados estos dos eslabones, el resto se colocan dando una forma aproximada y evitando el contacto con los piñones y el carril. El último paso es suprimir las restricciones de los dos eslabones opuestos, eliminar las fijaciones y activar el conjunto de contacto entre los eslabones y los piñones (Figura 3.187).



Figura 3.187. Perspectiva axonométrica del ensamblaje de los elementos de la draga.

Por otro lado, el ensamblaje del sistema de cuchara es independiente del resto de ensamblajes y mucho más sencillo.

En primer lugar, se coloca el bastidor en su sitio restringiendo por oposición y alineación todos sus movimientos, por lo que funciona como un elemento empotrado. A continuación, se colocan por inserción (restricción de inserción y alineación), la unión bastidor-polea, y para colgar el soporte metálico de la polea superior, es necesario insertar el seno del gancho en el eje inferior de la unión bastidor-polea, siempre mediante el mismo proceso.

Seguidamente, se monta la polea aparte, carcasa, polea y eje, y se inserta el eje de la polea en el eje taladrado del soporte metálico, alineándolo respecto al borde.

El siguiente paso es colocar la cuerda en su posición. Como ya se ha comentado, Autodesk Inventor Professional no considera elementos dinámicos, y la cuerda tiene unas propiedades que no pueden simularse, por lo que se adopta la solución de considerarla como un elemento rígido. Evidentemente esto limita al modelo ya que no puede simular el funcionamiento de la cuchara. A pesar de este inconveniente, esta limitación no resta valor al modelo, ya que para el análisis estático es perfectamente válido.

Como conclusión a lo dicho, hay que tomar la cuerda como si de una tubería se tratase, con unas propiedades físicas concretas, debidas al material que sí considera el programa.

Por lo tanto, se da forma a la cuerda y restringe su movimiento por inserción en la polea. La cuerda queda solidariamente unida a la polea, pero como ésta puede girar, la cuerda también lo hace.

A continuación, hay que ensamblar una segunda polea al modo de la primera e insertarla en su soporte metálico respectivo, que ya se vio que era distinto al primero. Seguidamente se fija temporalmente la cuerda para evitar su movimiento y se restringe por inserción la polea inferior en la cuerda.

El siguiente elemento a ensamblar es el conjunto de cucharas, y hay que ensamblarlo también aparte, para después colocarlo en el sistema. Para el montaje de las cucharas hay que empezar al revés, desde la última pieza modelada. Se toman las cucharas y se introduce por restricción el eje de la simple por el pasante de la doble, cuidando nuevamente el alineado. El siguiente paso es insertar los antebrazos en los extremos opuestos de las cucharas, y para ello, se restringe de la misma manera. Una vez unidos, el siguiente paso es traer la viga soporte de la cuchara y la pieza mecánica para la flexión.

Se toma la pieza metálica para la flexión y extensión, y se restringen por oposición sus caras internas con las caras externas de la viga soporte, quedando de esta manera libre de moverse en la dirección longitudinal de la pieza. Para ello, es importante colocarla en la posición correcta, con los taladros dobles hacia abajo. A continuación, se fija la viga y la pieza metálica para facilitar el resto de operaciones, recordando al final que hay que eliminar este tratamiento. Seguidamente se toman los extremos de los antebrazos y se insertan en la pieza metálica en los taladros dobles siguiendo el proceso habitual. A continuación, se toma el eje que une las dos cucharas y se inserta en el pasante inferior metálico de la viga soporte, quedando de esta forma, las cucharas perfectamente funcionales (Figura 3.188).



Figura 3.188. Perspectiva axonométrica del ensamblaje de las cucharas con su viga soporte.

Para terminar, se eliminan las fijaciones y se trae junto con el resto de elementos del sistema. De la parte inferior de la polea inferior pende una argolla. A través de esa argolla hay que pasar dos cuerdas cruzadas en direcciones perpendiculares. Estas cuerdas deben estar cosidas en su extremo formando un seno, y cada uno de esos senos se inserta en los cuatro pasantes superiores de la pieza metálica para la flexión de las cucharas. Este paso no es sencillo, pero hay una manera más simple de hacerlo.

Si se alinea en su posición el soporte con las cucharas a una distancia determinada de la polea inferior, es sencillo describir la trayectoria que debe hacer la cuerda para encontrar los pasantes. De este modo, a través del barrido de la trayectoria con una circunferencia se define perfectamente la cuerda en la posición que debe tomar. Por último, hay que insertar la polea y el tambor en la estructura soporte mediante la restricción por inserción, y definir la cuerda que une el tambor con la argolla superior de la viga soporte de cara a su maniobrabilidad (Figura 3.189).

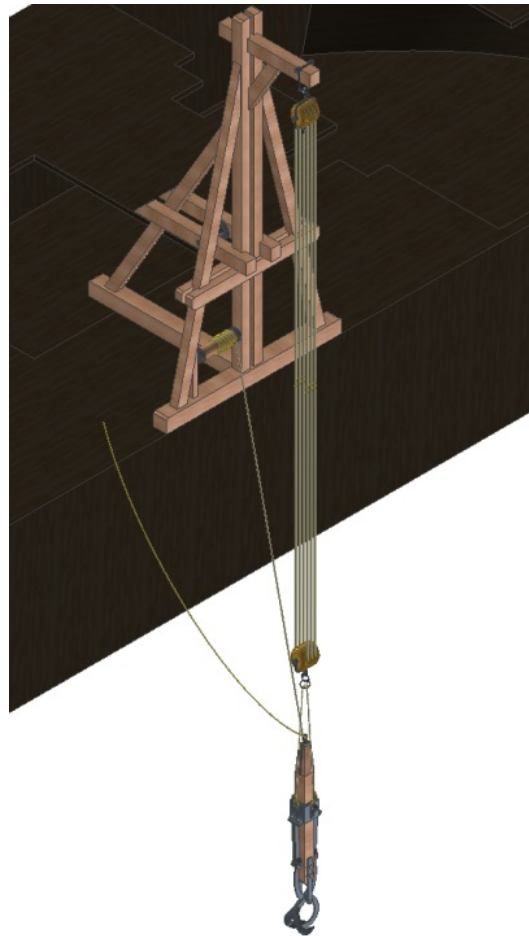


Figura 3.189. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema cuchara.

Quedan por ensamblar, ya de manera muy sencilla, el sistema de maniobra y el de elevación de la draga.

El sistema de elevación de la draga se ensambla empotrando las bases y los cojinetes interiores en su sitio. Para ello, hay que restringirlos por oposición con la cubierta y después alinearlos respecto a dos referencias horizontales. La primera base se alinea para quedar centrada en el extremo de la popa del barco, y el resto se alinean respecto a la base. Hay que recordar que los cojinetes que van sobre la base son dos y deben estar a una distancia de la borda de 2,625 m para que el eje encaje correctamente.

El otro cojinete, el que va en la borda, tiene un espacio destinado a este fin, por lo que su empotramiento es más sencillo. Una vez colocados los cojinetes se inserta el eje, usando el proceso ya conocido, y es imprescindible alinearlos respecto a uno de los cojinetes para que ruede libremente pero no pueda desplazarse longitudinalmente. Del extremo del eje hay que colocar la cuerda que llega al extremo de la draga, y para ello, de nuevo, la complicación reside en definir correctamente la trayectoria de la cuerda, ya que con el barrido de la misma por una circunferencia queda perfectamente definida (Figura 3.190).

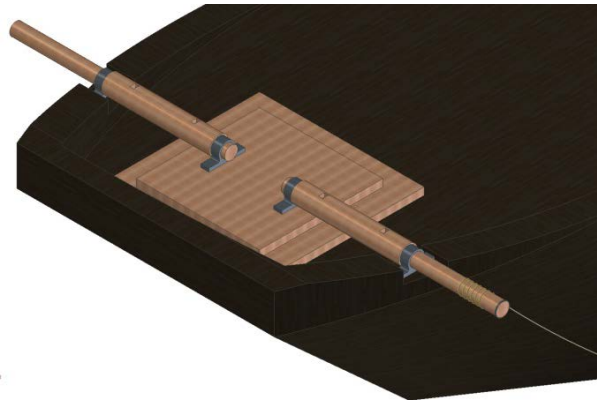


Figura 3.190. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema de elevación.

El ensamblaje del sistema de maniobra sólo tiene una dificultad y es la gran cantidad de elementos que ya pueblan el soporte de transmisión de movimiento a la draga.

Para facilitar las operaciones hay que montar aparte la barra de maniobra. Para ello, hacen falta tres elementos: la viga, el rodillo y el eje. En primer lugar, se inserta el eje del rodillo en el taladro practicado en la viga, haciéndose por restricción de inserción alineándolo con una de las paredes interiores del taladro. Después, del mismo modo se inserta el eje por el taladro practicado para el eje. En este caso, el eje debe asomar por ambos lados.

Una vez hecho esto se ensambla la barra con el rodillo boca arriba insertando el eje de la barra en el agujero destinado para él en el soporte, y al igual que antes, hay que alinear la barra para que quede en el espacio que para este fin hay en el soporte. Ahora se introducen los rodillos en el resto de espacios, a derecha e izquierda de los ejes de la draga y de fricción, que de nuevo tienen que quedar tangentes a dichos ejes, y para ello hay destinados unos taladros en el soporte. Si no quedan tangentes es por un mal diseño del soporte y ocasionarán futuros problemas.

Para terminar, hay que activar los contactos entre los ejes y el rodillo de la barra de maniobra. De este modo, cuando la barra está formando un ángulo mayor de 0° con la horizontal, el rodillo deja libremente funcionar al eje y, en cambio, cuando la barra forma un ángulo inferior a 0° la barra levanta el eje evitando el contacto entre el tambor y la rueda motriz (Figura 3.191).

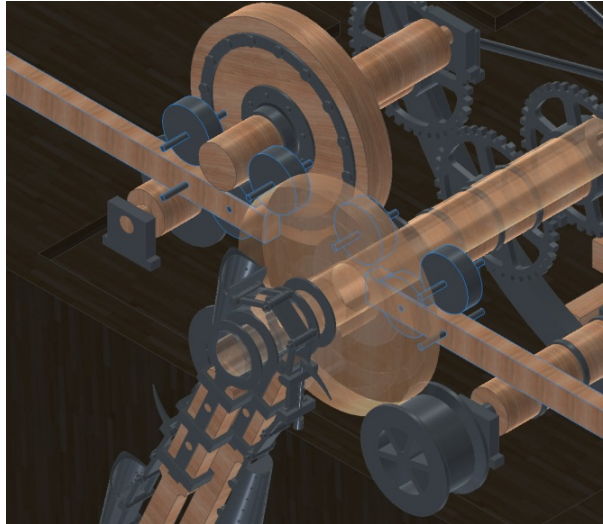


Figura 3.191. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema de maniobra.

3.6.3. Ingeniería Asistida por Ordenador

3.6.3.1. Preprocesado

Para realizar un estudio de ingeniería asistida por ordenador de la draga mecánica, es necesario determinar qué elementos son estructurales y cuales son accesorios de cara a la simplificación del modelo, y evitar altos requerimientos computacionales. Sin este paso previo, la simulación se vería excesivamente ralentizada debido al excesivo número de elementos que, a priori, intervienen en el cálculo. Por ello, al simplificar y eliminar los elementos accesorios de la simulación, se facilita el análisis y no se ven afectados los resultados del mismo.

- En el presente estudio, se ha eliminado el barco que actúa de soporte de la draga. Simular un objeto sobre otro que flota es una tarea complicada, pero las dimensiones del barco y las condiciones de trabajo en una zona portuaria hacen que se pueda prescindir del barco. Para ello, se caracterizará el soporte de la estructura de manera que sea la receptora de los esfuerzos sobre la draga.
- En segundo lugar, también se excluyen del análisis la máquina de vapor, la caldera y sus estructuras soporte. El único elemento que se va a respetar es el pistón del cilindro de la máquina, ya que es el elemento impulsor de todo el sistema de draga.
- Se excluyen también del análisis tanto las grúas como los ejes que posicionan la draga a distintas profundidades, ya que tampoco influyen estructuralmente en la misma.
- Por último, se respetan los elementos de soporte del balancín, de la biela cigüeñal y los soportes de cada una de las dos dragas.

Una vez aislado el sistema de la draga, se han respetado todos los elementos del mismo como se puede apreciar en la Figura 3.192.

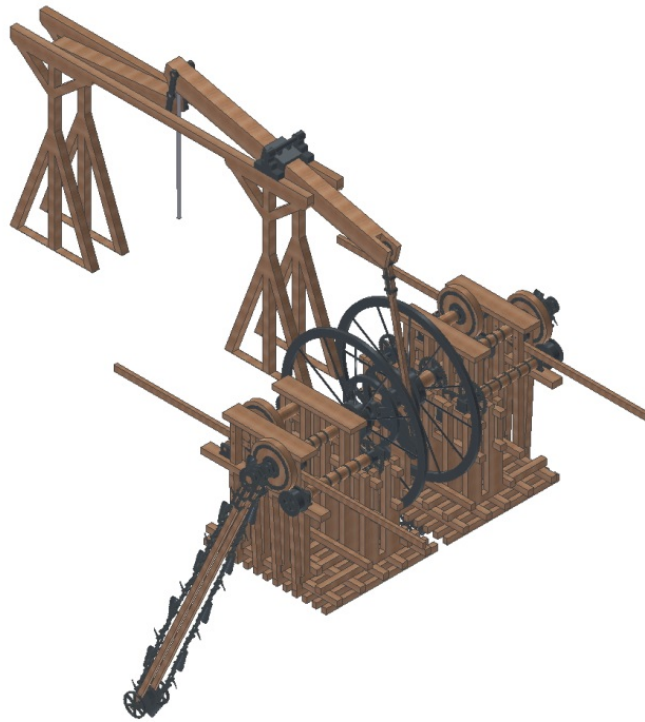


Figura 3.192. Perspectiva axonométrica del sistema simplificado de la draga tras el preprocesado.

3.6.3.2. *Asignación de materiales*

El siguiente paso es asignar un material a cada elemento. En principio, este paso se debería hacer en el modelado 3D de la draga, pero en muchas ocasiones, a la hora de ensamblarlo, hay que modificar o añadir piezas. Autodesk Inventor Professional sólo procederá al análisis del modelo si todas las piezas del ensamblaje tienen un material definido. En el mecanismo que se está analizando todos los elementos pueden ser correctamente definidos a partir de la biblioteca de materiales que proporciona el propio software, atendiendo a los que pudieron ser usados en la época, ya que ni en la memoria ni en las láminas se especifica el material de cada elemento. Sin embargo, sí se pueden distinguir los metálicos de los de madera, pero no se conoce concretamente qué materiales se utilizaron. Para las partes realizadas en madera se ha elegido el roble, abundante en los países del norte de Europa, y para las metálicas hierro fundido.

Al importar los materiales de la biblioteca del software, los elementos a los que se asigna dicho material adquieren sus propiedades físicas. Así pues, el hierro fundido utilizado en las piezas metálicas, tiene un comportamiento isótropo (se comporta del mismo modo en todas sus direcciones), y sus propiedades físicas principales son: módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (7.150 kg/m³) y tensión de rotura (758 MPa). Por otro lado, los elementos de madera están hechos de roble y sus propiedades físicas son distintas en cada dirección, es decir, se trata de un material ortótropo. La madera trabaja con mejores propiedades estructurales cuando lo hace en la dirección de la veta. En las otras dos direcciones ortogonales, los límites físicos son menores y por lo tanto, el trabajo es más limitado. A la hora de asignar materiales a la pieza es importante que el eje principal de la pieza sean el de la dirección de la veta: módulo de Young (210.000 MPa), coeficiente de Poisson (0,30), densidad (760 kg/m³) y tensión de rotura (41 MPa).

3.6.3.3. *Condiciones de contorno*

Tras asignar el material a cada uno de los elementos y una vez simplificado el modelo, hay que definir las condiciones de contorno de los elementos que tienen una función de apoyo. Autodesk Inventor Professional no define los apoyos de la manera clásica como empotrados, articulados,

móviles o de rodillo, sino que lo hace definiendo el grado de libertad de cada componente del apoyo.

Por lo tanto, se procede a definir en primer lugar las superficies que no tienen ningún grado de libertad. Así pues, se definen las superficies que están atornilladas al barco, fundamentalmente se trata de los soportes de las estructuras (Figura 3.193 (Izda.)) pero además, con el fin de simular la situación más desfavorable para la estructura, se va a fijar la superficie de contacto entre el eslabón y el diente de la corona inferior de la draga. Esta situación simula la parada de la draga al encontrarse con algún obstáculo (Figura 3.193 (Dcha.)).

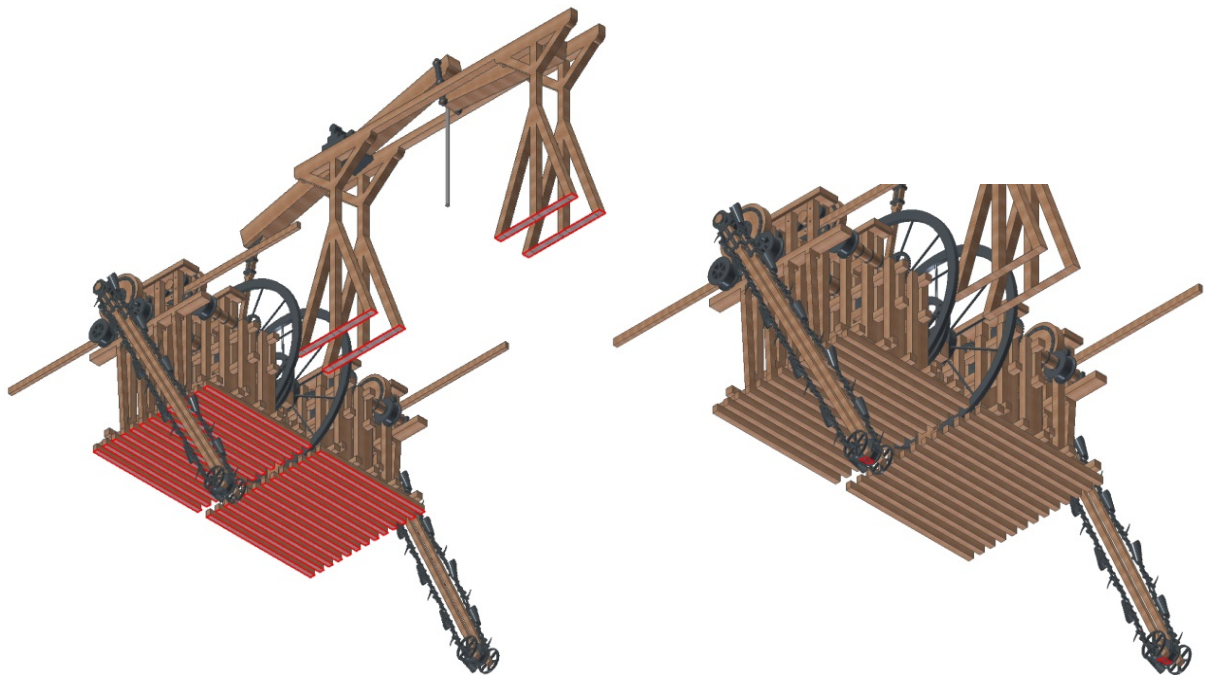


Figura 3.193. Restricciones fijas: base de los soportes (Izda.) y superficie del eslabón (Dcha.).

En segundo lugar, se definen las articulaciones. Las superficies que se definen de este modo tienen libertad para girar con respecto a un eje. En principio, al realizar el modelo se ha definido el contacto entre superficies de los elementos que participan en la zona articulada, por lo que no es necesario volver a asegurar que el elemento se comporta como una articulación. De todos modos, se definen las articulaciones fijas de los balancines que se encuentran en los soportes y que van a recibir esfuerzos notables (Figura 3.194).

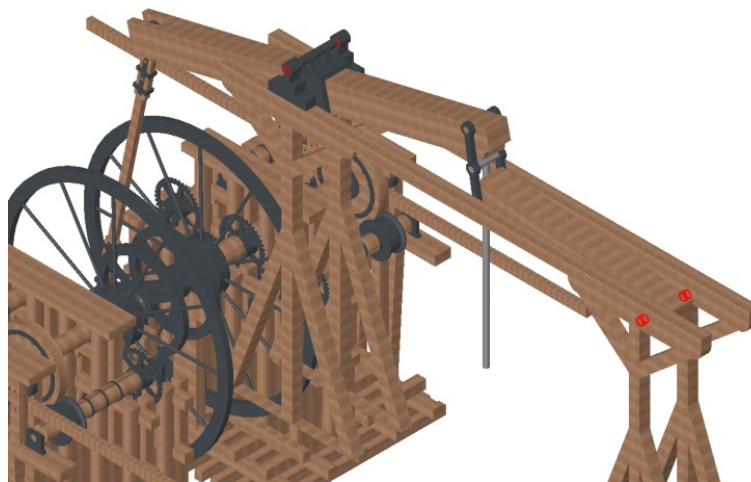


Figura 3.194. Articulaciones.

Finalmente, para terminar de definir las condiciones de contorno hay que establecer los contactos entre los elementos. Si el ensamblaje de las piezas se ha realizado correctamente, Autodesk Inventor Professional detectará automáticamente el contacto entre superficies próximas, y sólo en los lugares donde la geometría es más compleja, será necesario definir los contactos manualmente. En el presente estudio, ha sido necesario definir dos tipos de contacto manualmente: el contacto entre los tambores de fricción y algunos rodamientos que les servían de apoyo (Figura 3.195), y el contacto entre el eslabón y la superficie del piñón que le facilita el giro (Figura 3.196).

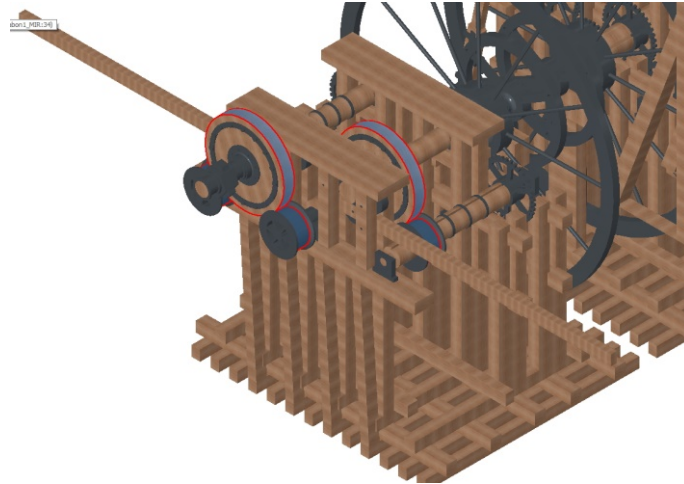


Figura 3.195. Contactos manuales entre los tambores de fricción y los rodamientos de apoyo.

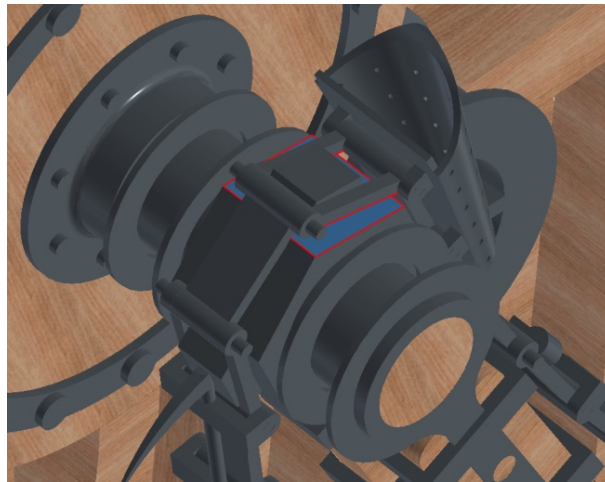


Figura 3.196. Contactos manuales entre el eslabón y la superficie del piñón.

3.6.3.4. Fuerzas aplicadas

El penúltimo paso antes de proceder con el análisis estático es determinar las fuerzas aplicadas sobre el mecanismo. Tres son los grandes grupos de acciones que van a intervenir sobre el mecanismo.

En primer lugar, la fuerza de la gravedad que va a incidir en todas las partes del mecanismo. Autodesk Inventor Professional facilita la definición de esta acción. Sin embargo, para que la gravedad sea una fuerza genérica y no esté aplicada en un punto concreto, hay que definirla indicando una intensidad y una dirección concreta. Habitualmente, si se han definido los ejes de modo estándar, el eje vertical será el Z y la intensidad será de $9,81 \text{ m/s}^2$ de modo que tome el

sentido negativo del eje Z. De este modo, el software representa automáticamente la fuerza de la gravedad como un vector aplicado en el centro de gravedad del mecanismo (Figura 3.197).

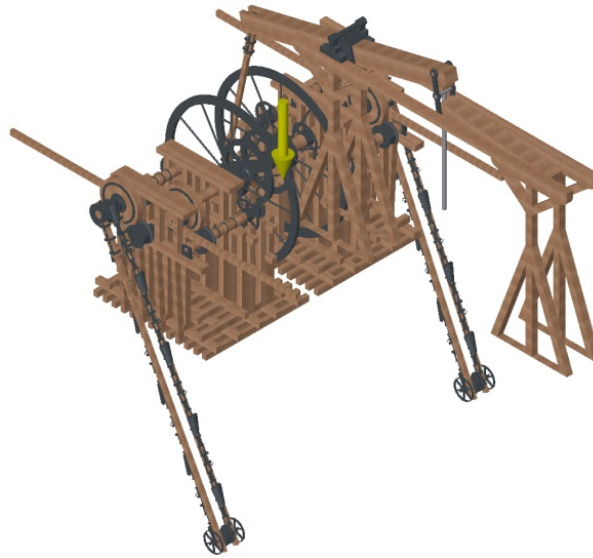


Figura 3.197. Fuerza de la gravedad representada en el centro de gravedad del mecanismo.

El segundo grupo de acciones es el que viene determinado por el peso de la arena que transporta cada uno de los cangilones. Para obtener un estudio de tensiones que determine la capacidad estructural del mecanismo es necesario hacerlo en la situación más desfavorable. Esta situación tiene lugar cuando los cangilones de la draga están cargados completamente de arena. Debido a la disposición de los mismos sólo están llenos de arena aquellos que están ascendiendo hacia el barco, por lo que se va a aplicar una carga puntual sobre el fondo del cangilón en cinco de los diez cangilones, ya que los otros se supone que están vacíos al ir en sentido descendente (Figura 3.198).

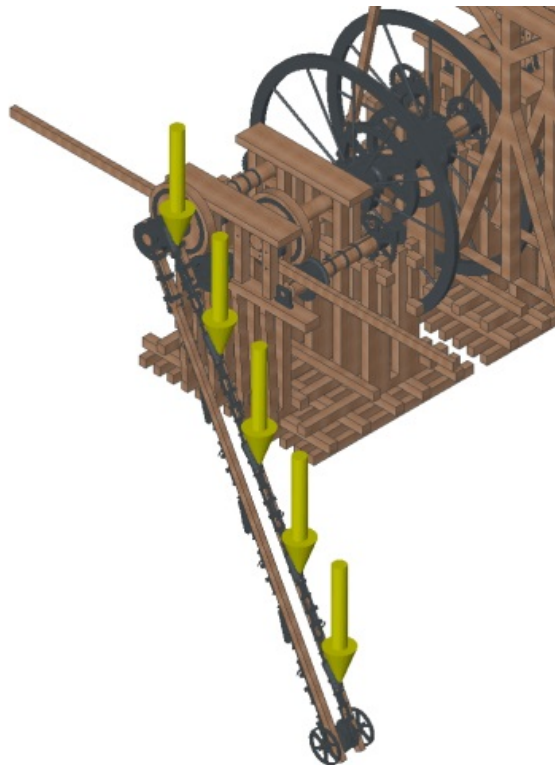


Figura 3.198. Fuerzas aplicadas en los cangilones (presión ejercida por la masa de arena).

Para simplificar el cálculo, no se va a tomar en consideración el agua, la arena mojada y la arena sumergida que darían lugar a cargas distintas, así que, si se considera la carga sin mojar y sin empuje, la acción va a quedar compensada, y apenas cambiará respecto a la situación real. Suponiendo que la arena tiene una densidad en seco (δ) de 1,6 kg/dm³, y sabiendo que el volumen máximo de un cangilón (V) es de 11 dm³, se puede calcular el peso del mismo:

$$P = m \cdot g = \delta \cdot V \cdot g = 1,6 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot 1.100 \text{ dm}^3 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 173,04 \text{ N}$$

Por último, la última acción a considerar tiene que ver con la fuerza ejercida por la máquina de vapor sobre el eje del pistón, que es el responsable de todo el movimiento de la máquina. De cara al análisis estático, se va a tomar la máxima fuerza que es capaz de transmitir la máquina de vapor al pistón del cilindro. Para ello, ha habido que acudir a estudios de la máquina de vapor de doble efecto de la época.

Thomas Tredgold, ingeniero civil inglés, escribió en el siglo XIX un pequeño tratado sobre la aplicación de la máquina de vapor de doble efecto de Watt a la navegación (Tredgold, 1831). Por su semejanza con la de Betancourt se ha adoptado este método para calcular la fuerza de vapor del ingenio. Así pues, Tredgold cuantifica las pérdidas que tiene la máquina de cara a calcular el trabajo útil del mismo. Si se toma la fuerza del vapor en la caldera como 1, y se desprecian las pérdidas debidas al vapor no condensado, las otras pérdidas serán:

- 1º. La fuerza que produce el movimiento del vapor al entrar en el cilindro: 0,007
- 2º. El enfriamiento en el cilindro y en las tuberías: 0,016
- 3º. El rozamiento del émbolo y las pérdidas: 0,125
- 4º. La fuerza necesaria para expulsar el vapor: 0,007
- 5º. La fuerza necesaria para abrir y cerrar las válvulas, subir el agua de inyección y vencer el rozamiento de los ejes: 0,063
- 6º. La pérdida que proviene de interceptarse el vapor antes del fin del curso: 0,100
- 7º. La fuerza necesaria para mover la bomba de aire: 0,050

La suma de todas ellas es de 0,368. Por tanto, la diferencia respecto a la unidad es de 0,632. Además, se sabe que la fuerza de vapor en una caldera de carbón era generalmente de 900 mm de Hg, la temperatura del vapor no condensado de 50°C, y la fuerza que absorbía este vapor no condensado de unos 100 mm de Hg.

Así pues, la presión resultante (σ) será:

$$\sigma = (900 \cdot 0,632) - 100 = 470 \text{ mm de Hg}$$

Expresada en unidades del Sistema Internacional equivale a una presión de 0,63 kg/cm².

La presión que ejerce el vapor de agua sobre el émbolo viene definida por la expresión de Pascal

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

De esta fórmula, se puede despejar la fuerza que transmite el émbolo al pistón, teniendo en cuenta las dimensiones de la superficie del émbolo (S).

$$S = \pi \cdot r^2$$

$$F = \sigma \cdot S = 0,63 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 6.713,48 \text{ cm}^2 = 41.489 \text{ N}$$

En la Figura 3.199 se representa la fuerza de 41.489 N ejercida por la máquina de vapor sobre el pistón que mueve el mecanismo de la draga.

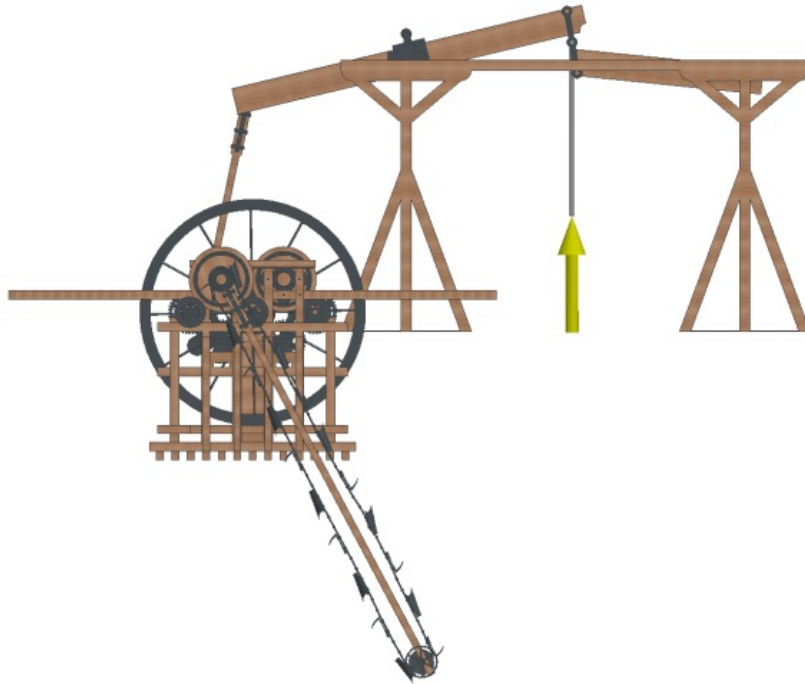


Figura 3.199. Fuerza ejercida por la máquina de vapor sobre el pistón.

3.6.3.5. Discretización o mallado

La discretización o mallado es el paso previo al análisis estático. Para ello, se va a elaborar una malla de geometría variable que caracterice la geometría de la draga mecánica del modo más aproximado. El tamaño de la retícula de la malla determina la aproximación más fidedigna al modelo. En principio, cuanto menor es el tamaño de la misma mejor se ajusta, pero esto tiene su contraposición en el análisis de tensiones, ya que un tamaño excesivamente pequeño de la malla puede viciar aquél pues en las superficies pequeñas, los contactos entre elementos pueden hacer crecer la presión de manera inapropiada. Debido a esto hay que procurar que el tamaño de malla sea el apropiado, evitando los dos extremos.

El software utilizado confecciona una malla estándar de forma automática (Figura 3.200), atendiendo a unos valores predeterminados que generalmente son una buena referencia. Las variables por las que se guía son: el tamaño medio de la malla (10% de la longitud del elemento a discretizar); el tamaño mínimo del elemento (al menos un 20% del tamaño medio); el factor de modificación (entre mallas contiguas no hay una diferencia mayor del 1,5) y el ángulo máximo de giro (máximo de 60° entre caras contiguas de la malla). Los valores tomados por defecto pueden ser modificados, pero en la presente investigación se han respetado estos valores ya que presentan una geometría muy similar al modelo y no hay, a primera vista, ningún elemento que presente problemas en su discretización.

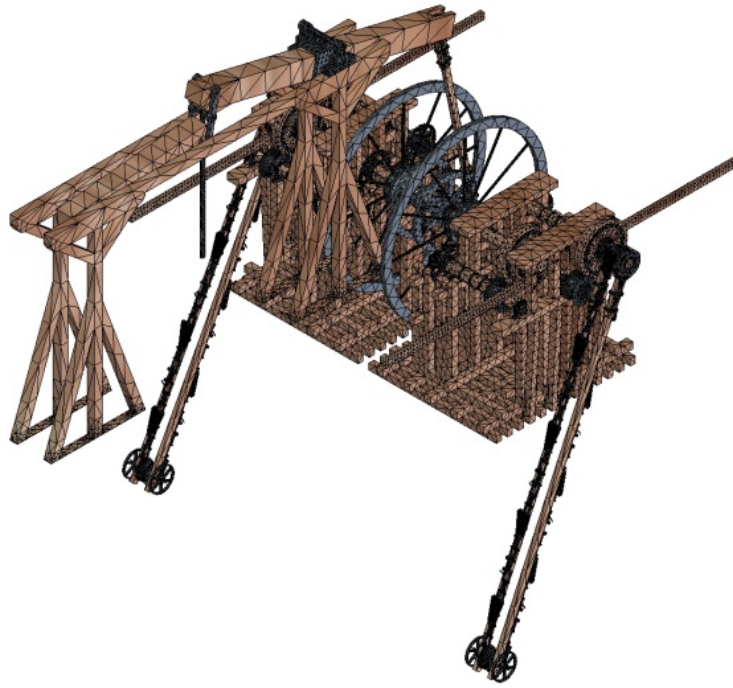


Figura 3.200. Discretización automática obtenida.

En teoría, como se ha apuntado más arriba, los elementos con una geometría más complicada pueden ser mallados manualmente, determinando la longitud del mallado. Los elementos circulares o esféricos suelen plantear problemas si son de pequeño tamaño. En estos elementos suele ocurrir que, debido a la convexidad o concavidad de la superficie, la malla converja en las zonas interiores, dando lugar a una retícula excesivamente pequeña que vicia el análisis. En estas zonas es necesario controlar el tamaño de la malla para evitar la convergencia. Por otro lado, algunas piezas, debido a una geometría compleja, sufren distorsión porque la malla no se adapta bien. En estos casos el tamaño de malla debe definirse también dando una longitud menor que se ajuste mejor a la realidad de la pieza.

En el presente modelo tras un estudio del mallado automático, se ha decidido respetar los valores aportados por Autodesk Inventor Professional ya que el modelo, aparentemente disfruta de una retícula bastante aproximada a su geometría. Las piezas que presentan cierta convergencia en las partes interiores, como el cangilón que recoge la arena del fondo, no son determinantes a nivel estructural, y por lo tanto al no estar sometidas a una gran sollicitación, no distorsionan los resultados del análisis (Figura 3.201).

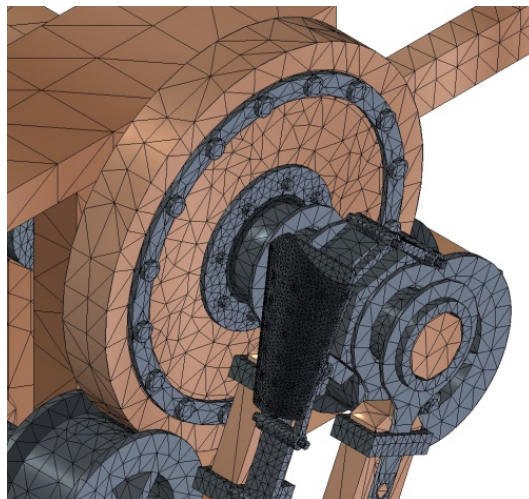


Figura 3.201. Cangilón de la draga en la que se aprecia una densidad de malla muy alta.

3.6.3.6. Resultados y discusión

El análisis estático de la draga mecánica del puerto de Kronstadt, muestra la distribución de las tensiones de Von Mises en todo el ensamblaje, los desplazamientos, las deformaciones y el coeficiente de seguridad.

Así pues, la distribución de tensiones de von Mises muestra que en general, el mecanismo está sujeto a bajas solicitaciones. Autodesk Inventor Professional asigna una escala de colores en función del valor de la tensión alcanzado, estableciendo el punto con mayor valor de la tensión de von Mises con el color rojo, y colores cercanos al azul para las superficies con menores solicitaciones. Como se puede apreciar casi toda la máquina trabaja con tensiones muy bajas (Figura 3.202), salvo el punto de tensión máxima (89,96 MPa), que corresponde a uno de los eslabones del rosario de cangilones. Esta pieza es una pieza de hierro fundido, y su límite de elasticidad (758 MPa), está muy por encima de ese valor (Figura 3.203). Por lo tanto, se puede decir, que en general, las uniones entre eslabones son las zonas más solicitadas de la máquina, pero, como se expondrá más adelante, trabajando siempre con poca fatiga.

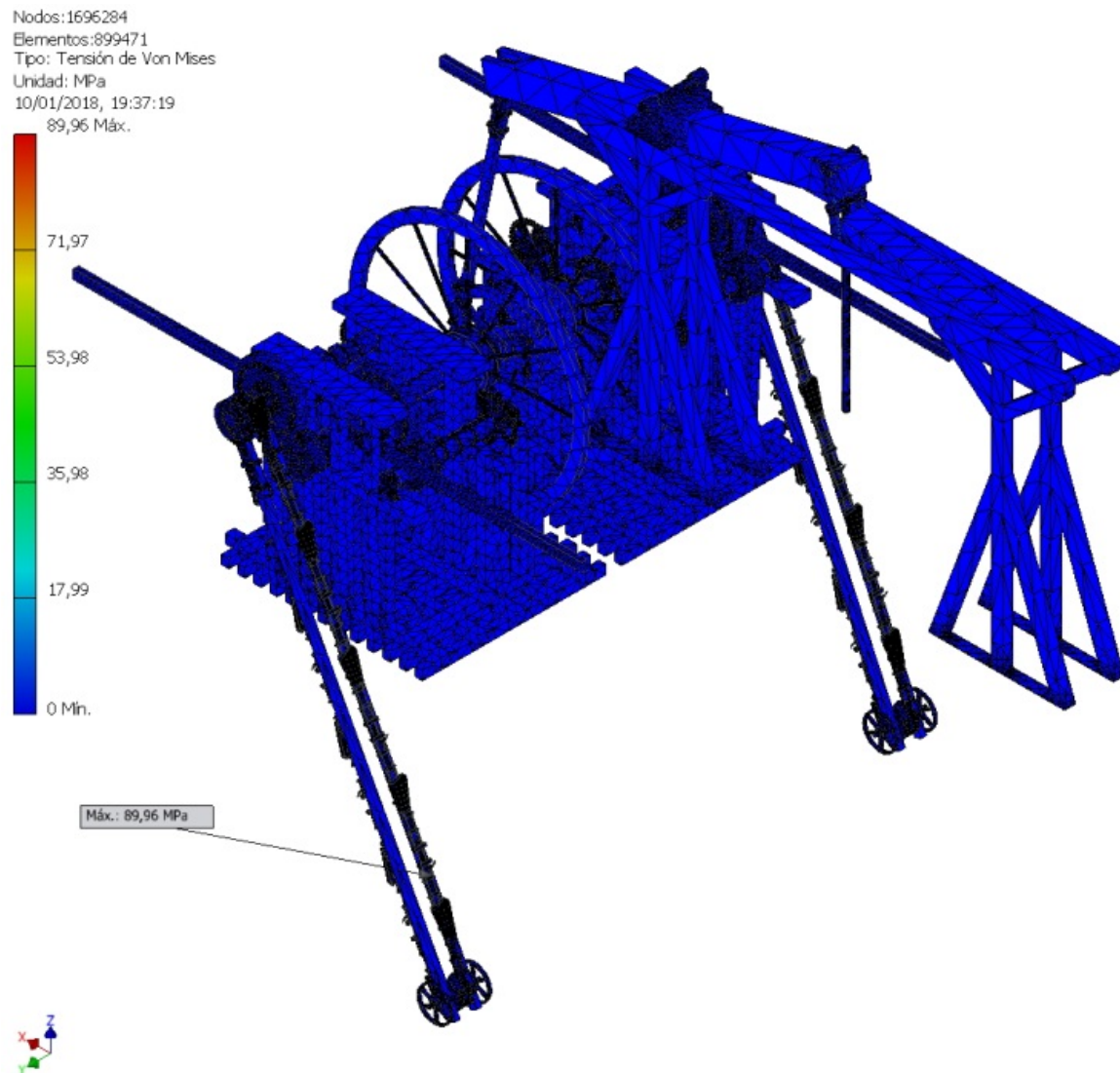


Figura 3.202. Distribución de tensiones de von Mises.

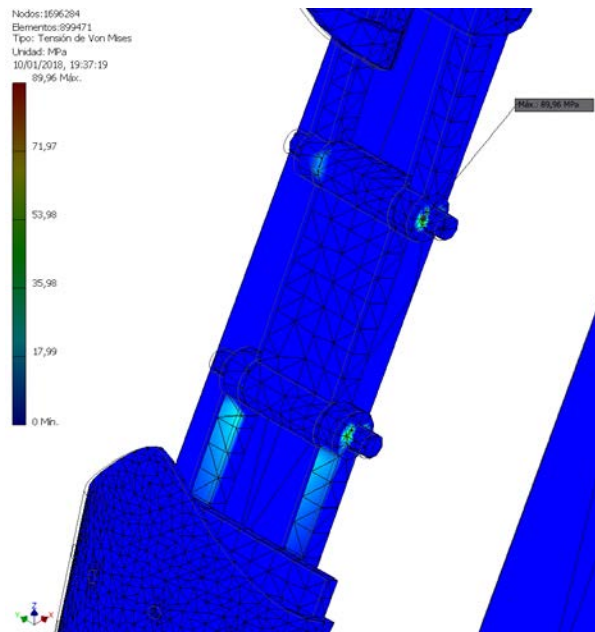


Figura 3.203. Tensión de von Mises máxima alcanzada en un eslabón del rosario de cangilones.

Si se atiende a otras zonas aparte del rosario de cangilones, se puede comprobar que la unión entre balancines es el otro punto que presenta una sollicitación más alta, en concreto, el lugar donde se une la pieza metálica que une ambos balancines con el balancín de la draga. En algún punto la tensión es de 54,57 MPa, también por debajo del límite de elasticidad, aunque en este caso, los materiales circundantes afectados presentan un límite de elasticidad menor, y hay que analizarlos con más detenimiento (Figura 3.204). Estas uniones son las que van a tener un coeficiente de seguridad menor como se expondrá más adelante. El resto de elementos del ensamblaje trabajan con tensiones muy bajas; por ello están poco sollicitadas y no sufren fatiga. Sin embargo, cabría preguntarse: ¿Es normal que una transmisión tan compleja presente tensiones tan bajas? La respuesta a este interrogante tiene que ver con el empleo por parte del proyectista de tambores de fricción en lugar de engranajes rectos de dientes.

Una máquina como la draga mecánica corre el peligro de encontrarse en el fondo marino con un elemento que no sea capaz de mover. Así pues, la cadena sufriría un bloqueo que repercutiría en la transmisión. Sin embargo, al no haber dientes entre los ejes sino tambores de fricción, lo que ocurre es que esos tambores ruedan unos sobre otros, pudiendo llegar a calentarse o a deslizarse entre sí, pero no llegarían a romper. Este ingenioso procedimiento evita una rotura que en el mar podría llegar a ser peligrosa, ya que el elemento impulsor de la draga es el propio rosario de cangilones.

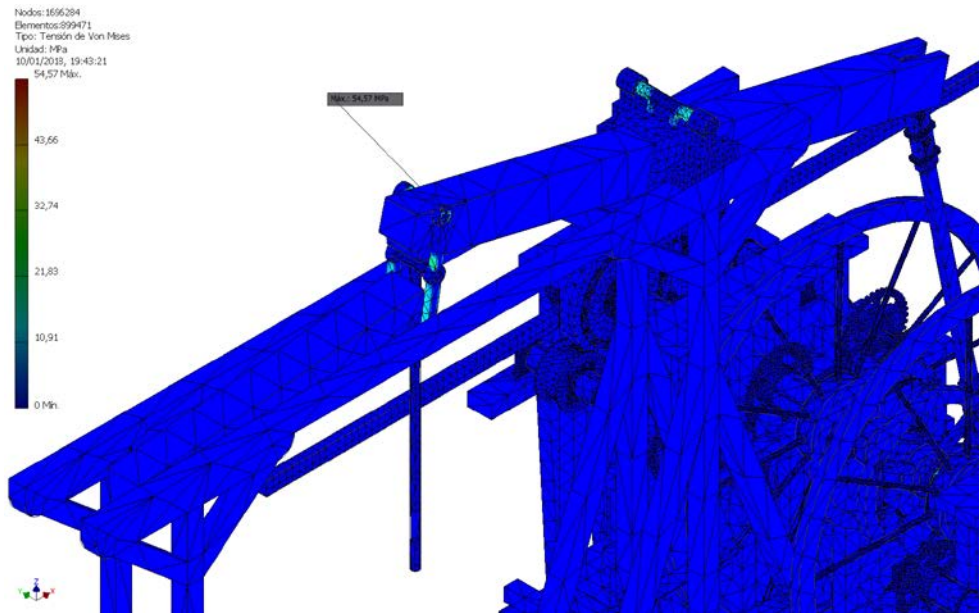


Figura 3.204. Tensión de von Mises en el eje del balancín de la draga.

Otro parámetro que ayuda a distinguir los problemas estructurales que puede presentar la draga es el análisis del coeficiente de seguridad. El coeficiente de seguridad muestra de manera teórica, los posibles puntos que pueden estar trabajando por encima de su límite elástico. Dicho parámetro se calcula como el cociente entre el límite de elasticidad del material que hay en un punto y la tensión de Von Mises para ese mismo punto, estableciéndose una horquilla de valores entre 0 y 15. Un coeficiente igual o inferior a 1 indica que en ese punto se trabaja por encima del límite de elasticidad, y por el contrario, un elemento se considera bien dimensionado cuando los materiales trabajan en un intervalo comprendido entre 2 y 4. Con un valor por encima de 6, se suele considerar que un elemento está sobredimensionado, y que sus dimensiones son excesivas.

Así pues, el punto con el coeficiente de seguridad más bajo es el contacto entre el balancín derecho (de la draga) y la unión entre balancines, punto delicado ya señalado anteriormente, al estudiar la distribución de tensiones de Von Mises. Su valor es de 3,01, y por lo tanto, trabaja por debajo del límite de rotura y de forma adecuada (Figura 3.205). De todas formas, conociendo que es un punto en el que hay contacto entre dos materiales distintos, y que las condiciones ambientales facilitan la fatiga de los mismos, hubiera sido conveniente realizar los pernos de los balancines como metálicos. Betancourt se da cuenta de este problema en el balancín derecho, de hecho, el eje del balancín es metálico, pero no tiene la misma opinión al ejecutar sus extremos. Un simple taladro en los extremos, y el uso de un pasante metálico de dimensiones menores, hubiera sido suficiente para solventar este posible problema.

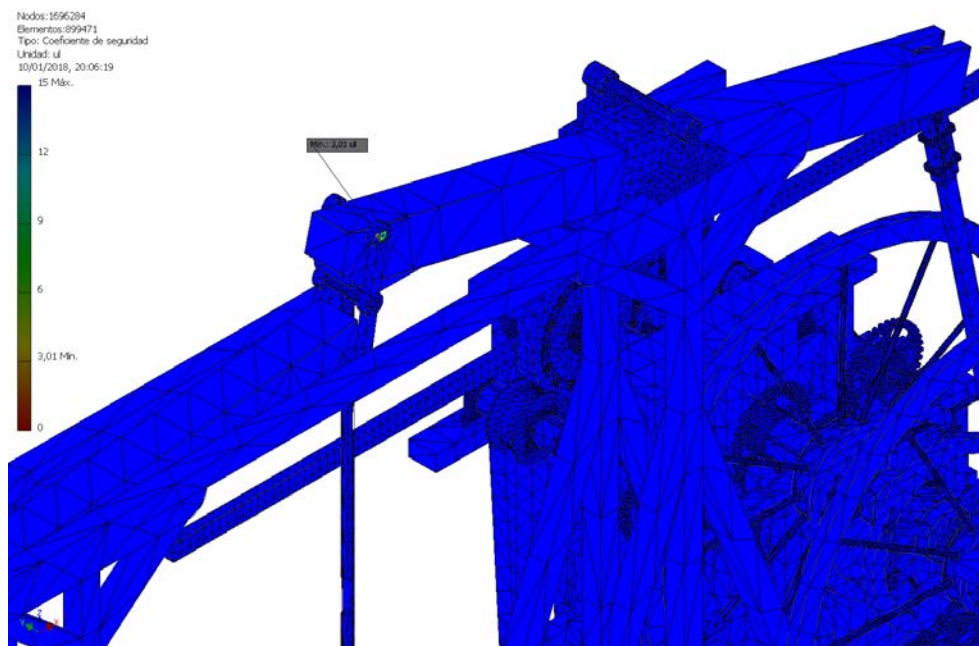


Figura 3.205. Elemento con el coeficiente de seguridad más bajo.

El resto de elementos del ensamblaje tiene un coeficiente de seguridad mucho mayor. Si eliminamos del análisis los balancines, se obtiene el siguiente elemento con un coeficiente de seguridad menor, con un valor de 6 (Figura 3.206). Se trata del contacto de los tambores de fricción con los rodamientos, en concreto, del tambor de fricción que se usa de freno (Figura 3.207). En cualquier caso, un coeficiente de seguridad de 6 está muy lejos de ser problemático, como ya se ha explicado.

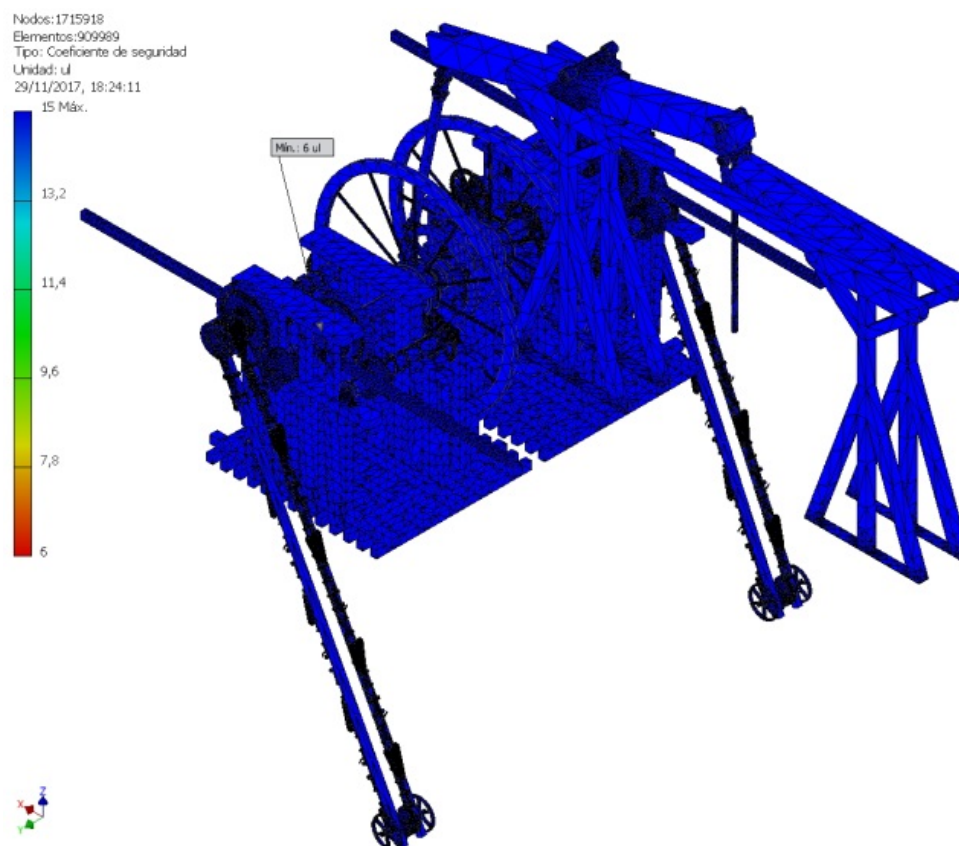


Figura 3.206. Elemento con el segundo coeficiente de seguridad más bajo.

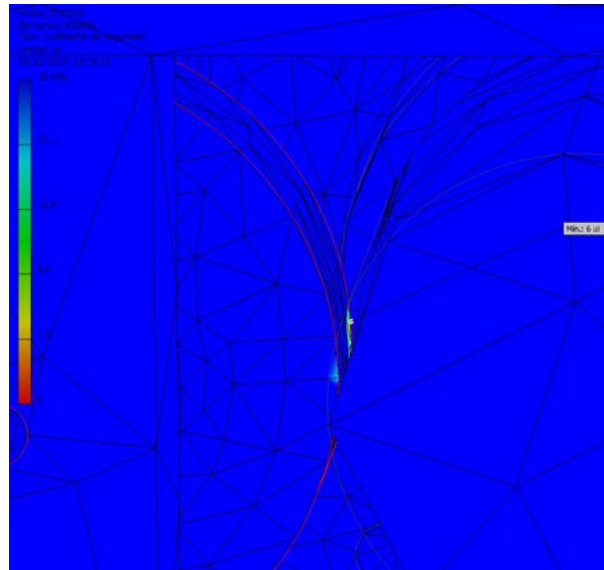


Figura 3.207. Detalle del contacto entre el tambor de fricción y el tambor de rodamiento.

Las deformaciones equivalentes del modelo muestran los elementos del ensamblaje que tienen una mayor deformación, lo que puede condicionar funcionalmente a la máquina haciendo que ésta no pueda trabajar. La deformación está condicionada por dos factores: la longitud del elemento y la sollicitación del mismo. Como se puede apreciar en la Figura 3.208, las deformaciones en general son casi imperceptibles. Asimismo, la Figura 3.209 muestra en detalle el lugar donde la deformación es mayor, de nuevo el perno donde se unen balancín derecho y la unión de balancines, pero se trata de una deformación de 0,12% de la longitud del elemento, y por lo tanto, casi imperceptible. Por lo tanto, la máquina tiene todas las garantías para funcionar correctamente.

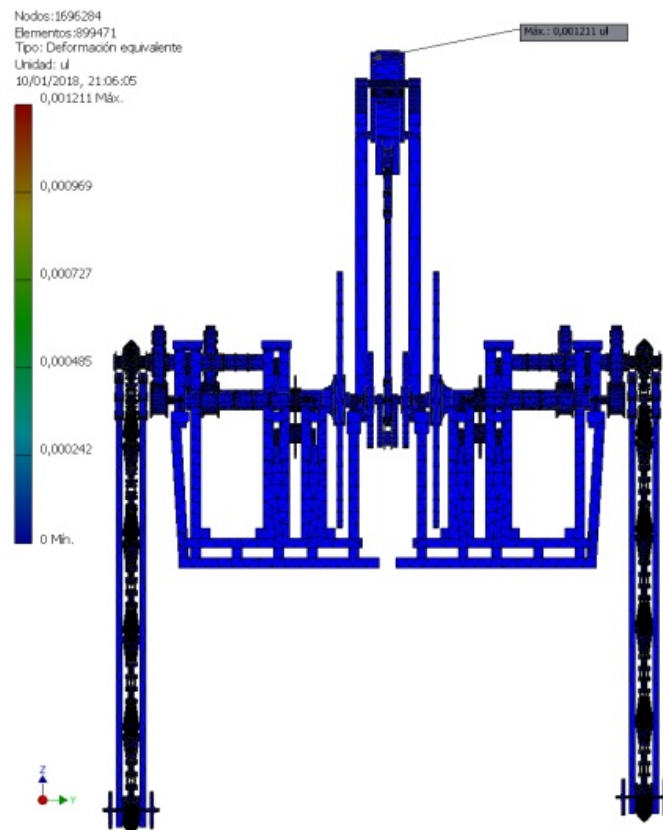


Figura 3.208. Distribución de deformaciones equivalentes.

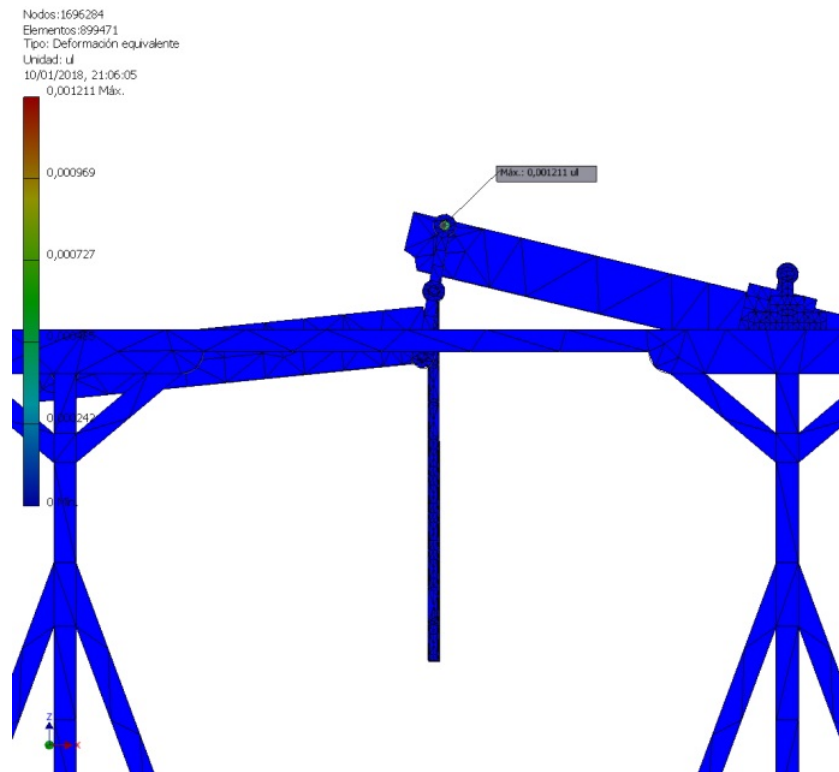


Figura 3.209. Punto donde se localiza la deformación máxima.

Por último, sobre los desplazamientos se puede decir que el punto de mayor desplazamiento se encuentra en el rosario de cangilones. El desplazamiento máximo no llega a los 2 cm (17,10 mm) por lo que en general se habla de cambios de posición que no van a afectar al correcto funcionamiento de la draga mecánica. De todos modos, este dato que por otro lado es lógico, subraya la idea de que la cadena de eslabones podría trabajar con algo más de tensión de modo que se evite cierta holgura para impedir que los eslabones se desengranen del piñón (Figuras 3.210 y 3.211).

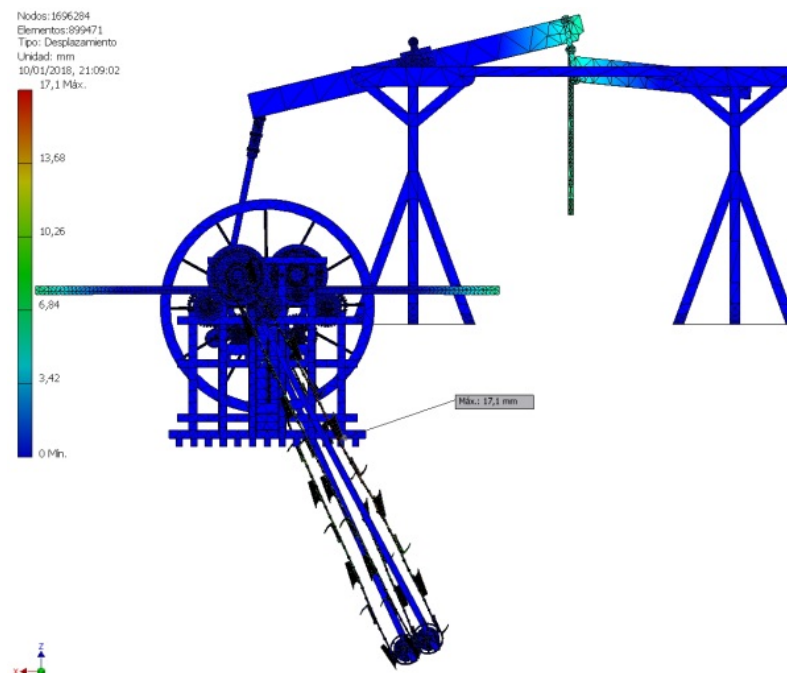


Figura 3.210. Distribución de desplazamientos.

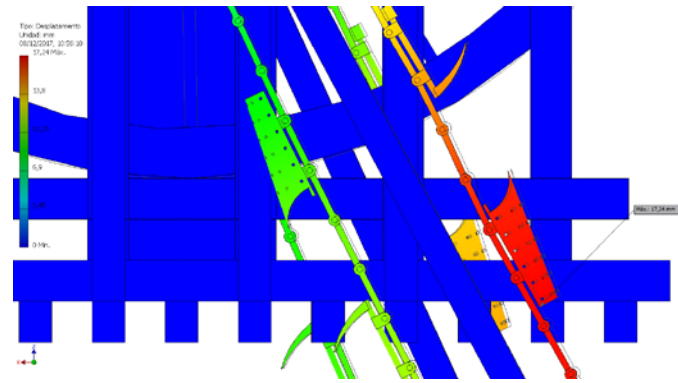


Figura 3.211. Punto con el desplazamiento máximo.

3.6.3.7. Conclusiones

Se han mostrado los resultados del análisis estático de la draga mecánica del puerto de Kronstadt, proyectada y ejecutada por Agustín de Betancourt y Molina en 1810, mediante técnicas de ingeniería asistida por ordenador (CAE) gracias al concurso del software paramétrico Autodesk Inventor Professional.

La máquina dragadora instalada en un barco de 33 m de eslora, es una máquina muy grande y sorprendentemente compleja para la época en la que fue construida. Estaba impulsada por la máquina de vapor de doble efecto diseñada por Betancourt a partir de la de James Watt. Por un lado, el elevadísimo número de elementos de que se compone ha obligado a simplificar el análisis, por lo que se ha realizado un preprocesado inicial que centrara el objeto de estudio. Este paso previo no desvirtúa los resultados del mismo, ya que simplemente se han eliminado del análisis los elementos no estructurales o que no formaban parte directamente del mecanismo de la draga. Sin embargo, de no haber efectuado esta simplificación, el elevado número de elementos hubiera hecho casi imposible su análisis, arrojando resultados casi idénticos a los obtenidos tras el preprocesado.

Los resultados de las tensiones de Von Mises han confirmado lo que previsiblemente cabría suponer, ya que esta invención estuvo en activo durante años: la draga mecánica estaba bien dimensionada, obteniendo un modelo perfectamente realizable a partir de los planos. Además, el análisis confirma que todos los elementos trabajan muy por debajo de su límite de elasticidad por lo que, la elección de materiales y el dimensionado son correctos. Asimismo, llama la atención que las tensiones sean tan bajas, y eso se debe al uso de tambores de fricción en lugar de engranajes dentados. Esta innovación consigue reducir las tensiones en los contactos de las transmisiones, consiguiendo con ello evitar las roturas en los ejes, alojados en un lugar de difícil acceso y responsables de una función tan importante como la movilidad de barco.

Las tensiones de Von Mises más altas se localizan en la unión entre los eslabones de la draga, pero como el material empleado en el rosario de cangilones es hierro fundido, está lejos de alcanzar el límite de elasticidad del mismo.

Por otro lado, el estudio del coeficiente de seguridad nos ha deparado en cambio alguna sorpresa, ya que algunos elementos de la unión entre balancines (aquellos que son de madera), sufren tensiones altas para el material en el que están realizados. Los pernos de madera del balancín de la draga tienen un coeficiente algo mayor que el resto y por lo tanto, el material sufre fatiga. En un medio como el marino donde los materiales sufren un desgaste aún mayor sería conveniente que esos pernos se reemplazaran por una pieza metálica que atravesara el balancín y lo conectara a la pieza de hierro fundido de la unión de balancines. Asimismo, las deformaciones y desplazamientos son pequeños, y confirman que la estructura está perfectamente dimensionada.

A pesar de no poseer una información planimétrica detallada, es reseñable que el dibujo tenga una proporcionalidad casi perfecta. Hoy en día, se podría decir que la máquina de Betancourt está sobredimensionada ya que los proyectistas trabajan con coeficientes de seguridad con valores entre 3 y 4. Por tanto, se podría aligerar la estructura en muchos puntos, aunque en la época de su construcción no existía el estudio de resistencia de materiales y por lo general, las invenciones estaban sobredimensionadas.

Betancourt consigue con su ingenio algo que hay que valorar ya que no sólo logra el objetivo que se propone de crear una máquina capaz de dragar los fondos de un puerto, sino que además deja como legado el uso de transmisiones por rozamiento que facilita la regulación de la velocidad de las dragas, evitando las roturas. Se trata de un sistema genial no utilizado con anterioridad en los inventos de la época. Por todo ello, nos hace confirmar que la fama del ingeniero español y su dominio de la mecánica no son un juicio sin fundamento, la draga mecánica del puerto de Kronstadt, fue la primera construida sobre un barco y autopropulsada, confirmando desde el punto de vista de la ingeniería el juicio general de la historia.

3.6.4. Impresión 3D

La draga para el puerto de Kronstadt es quizás la invención que más esfuerzo ha requerido para su impresión 3D, pues el elevado número de piezas ha hecho necesario un estudio previo para determinar cuáles convenía importar individualmente y cuáles como ensamblaje. La decisión de tomar determinados ensamblajes como una única pieza en STL ha dependido de la facilidad para obtener el ensamblaje final.

Por otro lado, de la misma manera que en el análisis CAE se dejaron de lado ciertas partes del barco para focalizar el estudio en el mecanismo innovador, a la hora de modelizar la draga se ha atendido al mismo criterio. Si se hubiera modelizado completamente la draga hubiera sido necesario trabajar con una escala muy pequeña que apenas permitiría mostrar los detalles del mecanismo de la misma, y por ello, se ha optado por modelizar solamente el mecanismo de la draga a una escala mayor (1:40), prescindiendo del resto de elementos. Para hacerse una idea, basta decir que, si se hubiera impreso el barco a esa escala, éste tendría una eslora de casi 120 cm y una anchura de 45 cm. Así pues, la elección de dicha escala permite imprimir todos los elementos con un detalle suficiente para que el modelo pueda moverse con libertad, engranando todas las piezas y haciendo visible el funcionamiento del mecanismo (Figura 3.212).

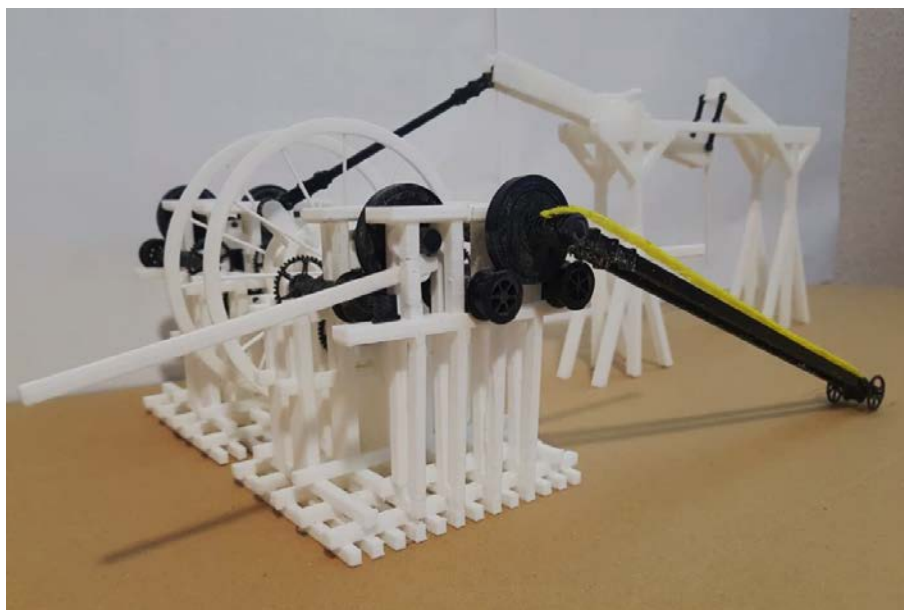


Figura 3.212. Vista general de la impresión 3D.

Para la impresión del mecanismo, un aspecto especialmente delicado, ha sido la orientación de cada uno de los cuerpos, ya que varios de los elementos a imprimir, sobre todo el gran bastidor sobre el que se apoyaban los ejes, generaba una gran cantidad de material soporte, principalmente en lugares donde estaban establecidos los apoyos de los ejes.

Por otro lado, los elementos que necesitan una definición mayor como los ejes, las bielas, la estructura donde descansa el rosario de cangilones de la draga y el elemento de unión de los balancines, han sido impresos con mayor calidad, utilizando resina fotosintética en la impresora Stratasys Objet 30, y el resto de elementos, a excepción del rosario de la draga, se han impreso en PLA utilizando la impresora Airwolf. El rosario de la draga (Figura 3.213) se ha impreso en un material flexible para poder recrear la adaptabilidad de los eslabones a la geometría de los engranajes, utilizando para ello PLA flexible en la impresora Airwolf.

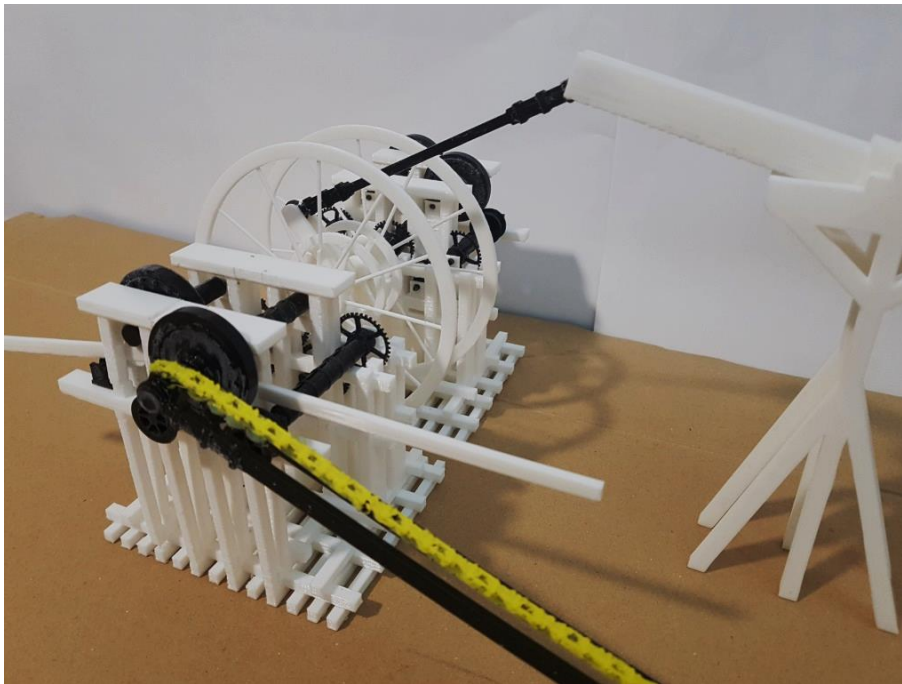


Figura 3.213. Detalle del rosario de la draga.

La impresión ha dado como resultado elementos de buen tamaño, lo que facilitado el trabajo de retirada de material soporte, fundamentalmente en el bastidor que sustenta los ejes, quedando dicho conjunto listo para albergar los apoyos y los ejes, y permitiendo el movimiento del sistema.

Asimismo, el montaje del mecanismo de la draga sí ha presentado dificultades poco previsibles, ya que, en un principio, el bastidor se había impreso como una sola pieza y los ejes no se podían colocar en sus respectivos espacios. Este hecho muestra la necesidad de ser especialmente ordenado en el montaje del mecanismo, especialmente teniendo en cuenta que dicho bastidor se encontraba bajo la cubierta del barco y, por lo tanto, la maniobrabilidad era más limitada que en tierra firme. Las dimensiones tanto de los ejes como del bastidor también aconsejaban el uso de grúas o poleas que facilitaran elevar los distintos elementos del mecanismo.

En primer lugar, es necesario montar los balancines con su respectiva estructura soporte, para colocar después el elemento de unión entre ambos, y pasar el extremo del pistón por el hueco de la zona media de dicho elemento. Por el extremo opuesto del balancín principal se coloca la biela, que más adelante conectará con el volante de inercia del mecanismo de la draga. Llegados a este punto hay que comenzar a montar el bastidor como se indicó en la secuencia de montaje (Figuras 3.154 y 3.155).

Los cuatro primeros pasos del ensamblaje podrían imprimirse como una única pieza en el modelo, pero es a partir de ese momento cuando hay que tener especial cuidado y orden a la hora de colocar los diferentes ejes. Los primeros en ser colocados son las dos coronas externas con sus respectivos apoyos en su lugar exacto en la zona inferior del bastidor. Colocadas dichas coronas se dispone una barra horizontal en una segunda altura (quinto paso del montaje del bastidor). Seguidamente sobre esa barra del soporte se colocan en primer lugar los ejes auxiliares 1 y 2, teniendo especial cuidado de que engranen con las coronas anteriormente colocadas.

El momento más delicado del montaje es la colocación del eje principal. Este eje, el tercero en colocarse, también va engranado con las dos coronas, pero además lleva ensamblado en su extremo el enorme volante de inercia de varios metros de diámetro. Para que éste quede en su sitio y todo el conjunto quede apoyado correctamente, en un primer momento, el eje principal debe estar algo desplazado de su posición definitiva, de manera que sólo se ensamble con el volante de inercia cuando el cigüeñal completo esté apoyado en su lugar exacto. Por lo tanto, tras colocar el eje principal y desplazarlo unos centímetros hacia el exterior, hay que terminar de ensamblar el bastidor. Así pues, una vez terminado de ensamblar el bastidor, se coloca con sumo cuidado el cigüeñal completo (ya que es una única pieza metálica con dos volantes de inercia), que debe apoyarse en su lugar exacto en el bastidor fijando uno de sus apoyos. Para fijar el apoyo el conjunto debe estar suspendido en el aire por una grúa, y terminado de fijar el apoyo del cigüeñal se ensambla el eje principal introduciéndolo en su posición funcionando solidariamente con los volantes de inercia. A continuación, se introducen en el bastidor las barras de maniobra articulándolas en su lugar para que después puedan desplazar verticalmente a los dos ejes que quedan por ensamblar. Por último, se colocan el eje de fricción y el eje de la draga. Finalmente, terminada esta delicada operación, se ensambla la biela y el cigüeñal quedando los ejes vinculados al balancín principal y al pistón que origina el movimiento (Figura 3.214).

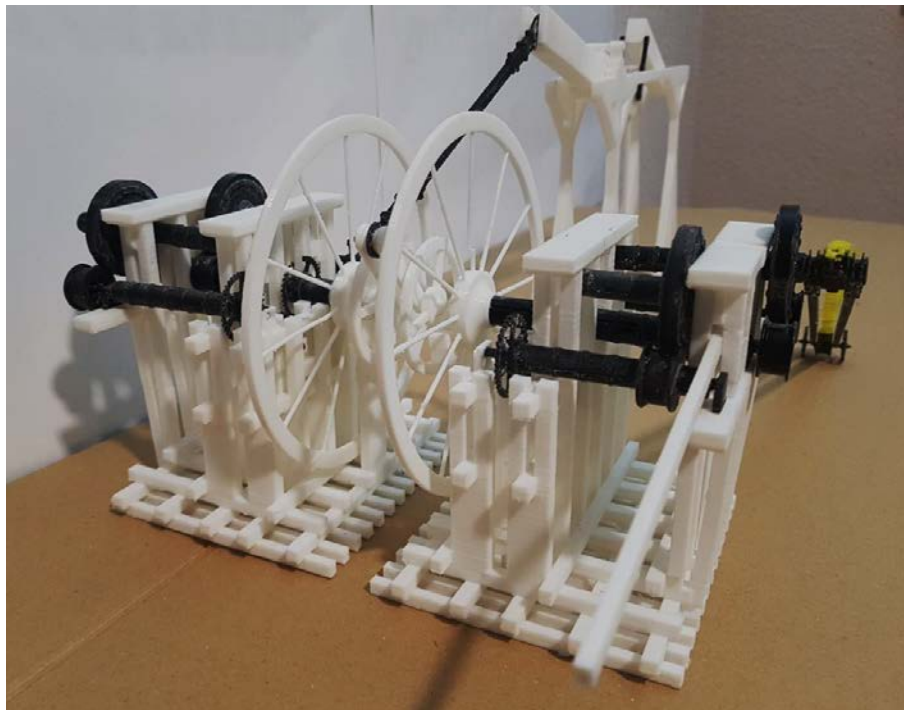


Figura 3.214. Detalle de la posición de los ejes en los bastidores.

La última parte es el ensamblaje de la draga propiamente dicha que se puede hacer en tierra firme. El primer paso es atravesar el piñón inferior de la draga por un eje colocando a continuación sendos carriles de la draga por sus extremos y finalmente las ruedas.

Seguidamente, se coloca el conjunto de eslabones con sus cubos y ganchos a lo largo de dicho carril, pero el último eslabón, el de la zona superior, no debe ser ensamblado todavía hasta que no se coloque todo el conjunto sobre el extremo del eje de la draga que termina en un cabezal en forma de piñón. Esta última operación hay que hacerla sobre el agua en el puerto. Así pues, al ajustar los extremos de los carriles sobre el eje de la draga y terminar de ensamblar el último eslabón en el piñón superior, quedaría completamente ensamblado el sistema de draga del barco.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

4.1. Introducción

Del elevado número de invenciones que proyecta Agustín de Betancourt y Molina, las cinco elegidas para la presente investigación, pretenden dar una visión panorámica de la versatilidad del ingeniero español. Todas ellas dan fe del ingente trabajo que desarrolló en el campo de la ingeniería civil durante los primeros pasos de la primera revolución industrial.

La elección estos ejemplos no obedece al azar, pues se han elegido cinco ingenios alejados entre sí dentro de la ingeniería civil. De este modo, se pone de manifiesto que Betancourt no fue un técnico centrado en el desarrollo de una línea de trabajo, ya que su faceta como ingeniero no omitió ninguno de los desafíos que se desarrollaban en la época. En nuestra opinión, es importante tenerlo en cuenta, a la hora de valorar su aportación al estado de la ingeniería de la época.

4.2. Conclusiones generales

La metodología utilizada para el análisis de cada uno de los ingenios proporciona buenos resultados y resulta óptima para realizar una valoración de los mismos. A esta primera conclusión se llega por varias razones.

De un lado, el uso de un software que basa su modelización en un ensamblaje ayuda a conocer cómo fue el proceso constructivo de la máquina estudiada. Esto proporciona un conocimiento no sólo del estado final del mecanismo, sino que también muestra las dificultades que pudiera haber en el montaje.

De otra parte, la utilización de un software de modelado paramétrico para la elaboración del modelo CAD, es especialmente indicado en arqueología industrial. Anteriormente, se ha comentado que el material de partida es deficiente en la información aportada, pues la memoria descriptiva y planimetría del expediente de cada invención, son escasas y las láminas no están dibujadas a escala por regla general, por lo que, en muchos casos resultan insuficientes para dimensionar correctamente el modelo. Debido a ello, es necesario un software que facilite la modificación de las dimensiones de las piezas e incluso la sustitución de unas por otras, integrando bibliotecas de materiales y relaciones paramétricas de geometría que faciliten el trabajo.

Además, se ha utilizado un software que tuviera incorporado un módulo de análisis estático, eliminando las posibles incompatibilidades si se hubieran utilizado diferentes programas. Así pues, al disponer en un único software con herramientas de diseño e ingeniería asistidos por ordenador, se facilita mucho el análisis estático, pues además el entorno de trabajo es similar al usado en el modelado CAD de la invención.

Asimismo, se ha utilizado un software que tiene un módulo de generación de videos de montaje como si de una perspectiva estallada se tratara, lo que ha facilitado la obtención de imágenes de la invención de alto realismo, facilitando una posterior explicación del funcionamiento de la máquina.

Por todas estas razones, y atendiendo a la metodología a utilizar, el software elegido para las tareas de diseño e ingeniería asistidas por ordenador, ha sido Autodesk Inventor Professional 2016 de la empresa Autodesk, permitiendo además las posibles interacciones con otro software de la misma empresa pues son perfectamente compatibles entre sí, como por ejemplo, CFD Design Study Environment, para realizar estudios de dinámica de fluidos por métodos computacionales.

Los resultados obtenidos han permitido identificar los elementos con mayor solicitud, descubrir los elementos mal dimensionados, identificar los elementos susceptibles de fabricar en otros materiales, y por último, presentar aquellas zonas que podrían interferir en el correcto funcionamiento de las máquinas.

Sin embargo, la metodología seguida tiene sus limitaciones. Estas limitaciones se han puesto de manifiesto fundamentalmente al tratar con dos tipos de elementos: los elementos que tienen un comportamiento dinámico (como es el caso de las cuerdas o los cables), y los elementos cuya geometría distorsiona el análisis (como es el caso de las cadenas). Así pues, para poder modelizar estos elementos, se han tenido que utilizar distintas estrategias que han modificado la precisión del análisis.

Por otra parte, el estudio pormenorizado de las invenciones de Agustín de Betancourt y Molina conduce a dos preguntas perfectamente legítimas que se tratarán de responder debidamente. En primer lugar, hay que plantear si el ingeniero aportó con sus invenciones alguna novedad a la ingeniería de la época, así como el alcance de sus aportaciones. En segundo lugar, si en la actualidad esas aportaciones siguen siendo vigentes o si por el contrario se tratan de un anacronismo.

Aportación de Agustín de Betancourt y Molina al estado de la ingeniería de la época

Como se ha comentado en la introducción, Betancourt trató de resolver los problemas técnicos a los que se enfrentaba la ingeniería en todos los frentes que ésta tenía abiertos durante la primera revolución industrial. A ninguno de ellos, el genial ingeniero dejó de dar respuesta, clara y concreta.

En el campo de la ingeniería civil, Betancourt trabajó fundamentalmente en dos grandes líneas de proyectos: por una parte, aquellas relacionadas con el transporte-comunicación-comercio, y por otra parte, las encaminadas a mecanizar procesos hasta entonces artesanales.

Dentro de la primera línea de proyectos, se encuentran los trabajos y memorias sobre canales, esclusas, puentes (los primeros puentes de cadenas del continente), el telégrafo óptico, la feria de Nijni Novgorod o el museo del transporte ferroviario del que el ingeniero español trazó sus líneas maestras.

Dentro de la segunda línea de proyectos, se centró en soluciones revolucionarias para automatizar procesos que requerían una inversión humana grande, ya sea a través del uso de la máquina de vapor que él mismo trajo al continente, ya sea usando otras fuentes de energía. Entre sus trabajos, cabe citar los molinos, los telares mecánicos, la prensa hidráulica, los ingenios para desaguar terrenos anegados tanto en minas como en pantanos, las dragadoras para los fondos de puertos o la máquina para cortar cañas de los canales, entre otros.

Fuera de estas líneas Betancourt también trabajó en la construcción de edificios (Catedral de San Isaac, la Casa de la Moneda o la Universidad de Vías de Comunicación de San Petersburgo), y en obras de carácter militar, como en la mecanización de algunas fábricas de armamento.

La presente tesis doctoral centra su atención en ingenios de las dos grandes líneas, y de su estudio, se desprende que hubo una gran contribución al estado de la ingeniería de la época e incluso que influyeron en el modo de trabajar de las siguientes generaciones de ingenieros. En esta misma línea se puede decir que Betancourt contribuyó, tanto por su producción como por su legado educativo, a los planes de estudio de las Escuelas de Ingenieros o por sus contribuciones al estudio de la mecánica. A juicio de muchos autores no cabe duda de que el ingeniero español puede calificarse como uno de los protagonistas principales de la primera revolución industrial.

Aportación de Agustín de Betancourt y Molina al estado de la ingeniería actual

Esta pregunta no tiene una respuesta sencilla. No es objeto de un trabajo enmarcado dentro de la arqueología industrial dar respuesta a una pregunta así, pero varios de los ingenios estudiados podrían tener interés para los ingenieros del siglo XXI.

Betancourt fue un auténtico experto en física mecánica, no en vano, escribió el primer tratado de cinemática industrial de la historia (*Essai sur la composition des machines*), una de las grandes obras sobre mecánica clásica de todos los tiempos. Las obras de las que se conserva memoria escrita, permiten apreciar que todos los ingenios del canario están precedidos de un análisis en profundidad que determina un problema concreto a afrontar. La solución a este problema se acomete siempre desde el punto de vista de la física mecánica, y una vez encontrada una solución teórica, pone todo su empeño en materializar la solución.

Hoy en día, la ingeniería ha avanzado mucho: la aparición de la transmisión por fluidos, el desarrollo de la ingeniería eléctrica y electrónica, o la evolución que han sufrido los motores a partir de combustibles más accesibles, entre otros, eran campos inconcebibles por aquel entonces. Parecería lógico asumir que un ingeniero del siglo XIX no tendría nada interesante que aportar a la ingeniería actual, donde la mecánica poco a poco, también ha dejado de ser la especialidad técnica más puntera.

A pesar de que lo dicho anteriormente es completamente cierto, se podría poner una objeción: en la actualidad los ingenios son mucho más capaces que en el siglo XIX, pero a la vez, son más dependientes. Desde el punto de vista energético, algunos de los ingenios de Betancourt son realmente algo fuera de lo común.

A modo de ejemplo, cabría comentar el siguiente caso. La esclusa de émbolo buzo es capaz de elevar y descender barcos de hasta 10 toneladas a casi tres metros de altura, sin gasto de agua ni consumo de energía. Un logro así sería todo un reto para la ingeniería del siglo XXI y Betancourt lo plantea y resuelve hace más de doscientos años. La solución presentada a los miembros de la Academia Nacional Francesa era la de una esclusa cuyo nivel dependía de un buzo usado a modo de émbolo: el buzo sumergido elevaba el agua a la altura del canal superior y emergido al del canal inferior. Lo genial del sistema es que Betancourt encuentra una solución teórica creando un entorno energéticamente aislado, y para ello, sitúa un contrapeso a una distancia determinada de forma que el buzo logra siempre una situación de equilibrio, independientemente de la posición en la que se encuentre aquél. La consecuencia de haber llegado a esta solución facilita que una persona, sin apenas necesidad de realizar una gran fuerza, pueda elevar manualmente barcos de hasta 10 toneladas. Las esclusas utilizadas en la actualidad para el transporte fluvial en Europa tienen un gasto grande de agua que hace que en algunas condiciones de estiaje no puedan utilizarse y requieren de electricidad para mover los motores de las enormes compuertas. Por lo tanto, la solución aportada por Betancourt permitiría diseñar esclusas con mejores resultados desde el punto de vista ambiental, económico y energético.

4.3. Conclusiones particulares

A continuación, se comentan los cinco ingenios elegidos para esta tesis doctoral, concretando específicamente, en qué consiste la aportación al estado de la ingeniería de Agustín de Betancourt y Molina.

Por una parte, la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos presenta dos recursos originales. El primero de ellos, es el uso de ejes excéntricos para que las palas aprovechen la

acción del viento con mayor eficiencia, pues de este modo la máquina necesita una menor velocidad del viento para poder funcionar. El segundo recurso, es el uso de un ingenioso sistema que mueve el eje principal de la máquina eólica para que trabaje en dos posiciones extremas, de manera que el eje principal gira dos tambores horizontales que engranan en cada una de esas posiciones de forma alterna. Así pues, al girar un tambor asciende un cubo lleno de agua, y al girar el otro tambor asciende el otro cubo, consiguiendo un movimiento continuo de ascenso y descenso a partir de un único movimiento del eje principal, sin el uso de engranajes intermedios.

Asimismo, la máquina cortadora de cañas y otras plantas acuáticas en canales y ríos navegables es la invención más sencilla de todas, pero en la época fue la más reconocida e incluso premiada, como se ha visto en el capítulo precedente. Sin embargo, y dentro de su simplicidad, tiene una serie de cualidades que la convierten en innovadora para la época. En primer lugar, tiene una capacidad de adaptación al entorno de trabajo realmente sorprendente, ya que Betancourt proyecta un sistema adaptable a distintas profundidades e inclinaciones de talud, y con cabezales intercambiables. Todo ello lo consigue gracias a ejes taladrados y al uso de pernos, así como a un sistema de corte que pivota sobre el centro de gravedad, por lo que las maniobras de corte no afectan la maniobrabilidad de la embarcación.

Por otra parte, el molino de sílex presenta otro novedoso ingenio sin parangón en la época. Se puede decir que Betancourt utiliza una especie de embrague para que el árbol horizontal de transmisión transmita el movimiento al eje vertical de rotación de las piedras de moler. El sistema empleado permite recoger dicho árbol horizontal de transmisión, retirando de este modo, la rueda hidráulica de la corriente de agua, y evitando su exposición prolongada, y por lo tanto, su deterioro. Asimismo, también permite que el eje vertical empiece a girar estando en movimiento el árbol horizontal de transmisión. El sistema proyectado en base a abrazaderas de rodamientos de rodillos, así como el juego geométrico de las piezas, hace que éstas se acoplen y desacoplen. El mérito de este sistema es mayor si se tiene en cuenta que el rodamiento se inventó a principios del siglo XX.

Respecto a la esclusa de émbolo buzo, y como ya se ha comentado anteriormente, el uso de un émbolo para elevar y descender el nivel del agua es una solución absolutamente original respecto a las esclusas de compuertas usadas en la época. Su influencia en las esclusas de pistón, aparecidas posteriormente, está fuera de toda duda. Asimismo, la esclusa ofrece una solución energética y de conservación de recursos muy adecuada para canales de poco aforo que pueden sufrir cierto estiaje.

Por otro lado, la draga mecánica del puerto de Kronstadt es en sí misma toda una novedad, ya que se trata de la primera draga instalada sobre un barco. Estos se accionaban a su vez por una máquina de vapor de doble efecto que él mismo diseñara, lo que hace de ella algo único en el mundo. Es de destacar el uso de tambores de fricción en vez de engranajes de otros tipos (cónicos o rectos) en los sistemas de transmisión, ya que evitan que en caso de bloqueo de alguno de sus elementos puedan romperse. Cuando en un sistema de árboles de transmisión engranados hay una parada brusca los engranajes y ejes sufren. En cambio, cuando se efectúa el análisis de tensión de Von Mises de los ejes dotados de tambores de fricción, la tensión que se transmite de unos ejes a otros es muy pequeña. Además, estos sistemas permiten transmitir el movimiento de manera diferencial, pues no es necesario detener el movimiento del pistón impulsor de la máquina de vapor para comenzar a mover la draga.

Asimismo, el sistema de maniobrabilidad de la embarcación es también original, pues se trata de una embarcación autopropulsada que se mueve como un sistema de oruga (probablemente el primer vehículo que se mueve con este sistema) aprovechando el proceso de dragado.

También es muy ingenioso, cómo Betancourt consigue que los movimientos de la draga a barlovento y sotavento sean distintos, a partir de un único movimiento generado por su máquina de vapor de doble efecto.

Por último, cabría enumerar una serie de conclusiones sobre casi todas las invenciones estudiadas: presentan acoples de engranajes troncocónicos (superando ya los de linterna comunes en la época), las zonas más vulnerables están fabricadas en materiales más resistentes como el hierro fundido, la mayor parte de las piezas van acopladas de modo que en la práctica no emplean los tornillos y tuercas (pues no existía la normalización) pero sí pernos y pasantes, y por último, usaban cadenas en vez de cuerdas permitiéndole cargar con materiales más pesados.

Por todos estos motivos, se puede decir desde la perspectiva de la ingeniería, que el ingeniero español fue un ingeniero sobresaliente e innovador por su metodología, por el uso de materiales, y por sus aportaciones y soluciones técnicas. Asimismo, se puede decir que es original en sus contribuciones, y que todos los ingenios analizados son realizables constructivamente, y perfectamente funcionales.

4.4. Desarrollos futuros

Como posibles desarrollos futuros se establecen 3 posibles líneas de investigación que den continuidad a la investigación realizada en la presente tesis doctoral.

Una primera línea de investigación, podría ser investigar acerca de la colección de láminas y memorias que hayan podido quedar del Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro. Es evidente que el desarrollo de la primera revolución industrial en España es un tema que lamentablemente ha sido muy pocas veces abordado desde el punto de vista de la ingeniería. La metodología abordada para analizar cada una de las invenciones de Agustín de Betancourt y Molina, podría ser perfectamente válida con las máquinas del Real Gabinete. Este estudio podría dar continuidad a la presente tesis doctoral, ya que el propio Agustín de Betancourt fue el director del Real Gabinete hasta que fue sustituido por Juan López de Peñalver, pues sus aportaciones al Real Gabinete fueron especialmente importantes. Sus constantes viajes por Europa, ya desde su periodo de formación en París, le dieron un conocimiento del desarrollo de la ingeniería civil muy detallado. Las máquinas e ingenios que ayudaron al progreso del desarrollo industrial, desde la máquina de vapor de James Watt hasta los moldes en hierro para las fábricas de cañones de bronce, fueron objeto de memorias y envíos esporádicos al Real Gabinete del Palacio del Buen Retiro. Todo este material, poco valorado en la actualidad, ayudó al desarrollo industrial de las Reales Fábricas en España, en las cuales cristalizó nuestra primera revolución industrial.

Una segunda línea de investigación se encuentra en el análisis en profundidad de diversos aspectos de la esclusa de émbolo buzo. Dentro de la memoria sobre un nuevo sistema de navegación interior, Betancourt propone una solución para crear una esclusa capaz de salvar unos desniveles superiores a los 9 metros. Para ello, presenta una importante modificación de la esclusa de plano inclinado observada en el condado de Shropshire cerca de la población minera de Coalbrookdale, del que hoy quedan las ruinas, la cual salvaba un desnivel de 63 m. Mientras este sistema de esclusa sobre raíles funcionaba gracias a la tracción animal, Betancourt proponía el uso de su sistema de émbolo buzo para elevar y descender los bateles en barcazas utilizando las mismas vías. Este sistema es similar al que en la actualidad se siguen usando en Ronquieres (Bélgica), en Saint-Louis-Arzviller (Francia) y en el canal del Elblag (Polonia). Sería interesante modelizar el sistema de plano inclinado ideado por Betancourt y establecer sus límites, así como si su modelo, ampliamente conocido en Francia e Inglaterra, tuvo influencia en los numerosos planos inclinados realizados después, y en los que quedan en uso en la actualidad. Asimismo, podría ser objeto de una investigación posterior el estudio del porqué la esclusa de émbolo buzo

no supera los estudios del análisis estático, cuando la solución teórica alcanzada por él es perfectamente válida. En la actualidad, se podría plantear el uso de materiales alternativos a los usados en la época, e incluso con estos materiales los límites de trabajo de la esclusa podrían ser ampliados a embarcaciones mayor envergadura y para desniveles cercanos a los 8 metros.

Por último, una tercera línea de investigación podría ser analizar las máquinas hidráulicas que aparecen en los principales tratados de la Ilustración Española (1700-1810), como la colección general de máquinas escogidas de Miguel Gerónimo Suárez y Núñez (1773), las conversaciones instructivas en las que se trata de fomentar la agricultura por medio del riego de las tierras de Francisco Vidal (1778), o el Volumen X (Tomo IX – Parte II) de la colección ‘Elementos de Matemática’ de Benito Bails, dedicado a la Arquitectura Hidráulica (1790).

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

AA.VV. 2009. *Agustín de Betancourt y Molina (1754-1824)*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales: Barcelona, 448 pp.

AA.VV. 2014. *Tecnologías de la impresión 3D*. Disponible en: <http://hxx.es/the-blog> (último acceso: 01/05/2018)

AENOR. 1998. *UNE-ENV 1991-2-4 Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones en estructuras. Acciones del viento*. Asociación Española de Normalización y Certificación: Madrid.

Arencibia de Torres, J. 1990. *Militares canarios célebres*. Gráficas Tenerife: Santa Cruz de Tenerife, 184 pp.

Betancourt y Castro, J. 1840. Noticias biográficas de don Agustín de Bethencourt y Molina. En: *Materiales de Historia de la Ciencia 2003*, pp. 54-61. Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia. La Orotava.

Betancourt y Molina, A. 1783. *Segunda memoria sobre las máquinas que usan en las Minas de Almadén, en que se expresan sus ventajas, y defectos, y algunos medios de remediarlos*. Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_memor_es_02_1783/ (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1789. *Mémoire sur une machine à vapeur à double effet*. Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_doubl_fr_01_1789/ (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1789. *Sur le nouveau moulin à vent de Ms. Menault*. Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_mouli_fr_01_18XX (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1795. *Moyen de franchir les chutes dans les canaux, etc.* Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/recic_moyen_fr_01_1795 (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1796a. Description of the "Plate of the Machine for Cutting Weeds in Navigable Canals and Rivers". *Transactions of the Society, Instituted at London, for the Encouragements of Arts, Manufactures, and Commerce* 14, 316-323.

Betancourt y Molina, A. 1796b. *Explication des principales parties du moulin pour moudre le silex*. Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_silex_fr_01_1796 (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1796c. *Acuarelas*. Biblioteca de Universidad de Vías de Comunicación de San Petersburgo. Disponible en: <http://fundacionorotava.es/portal/databases/digitisations/276> (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1797. *Mémoire sur un nouveau télégraphe et quelques idées sur la langue télégraphique*. Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/bregu_telegraph_fr_01_1797/ (último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1800. *Description d'une machine à couper les roseaux et les autres plantes aquatiques qui obstruent beaucoup de Canaux et de rivières navigables.*

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_coupe_fr_01_1800
(último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A.; Lesage, P.C. 1805. *Description abrégée de la machine employée au Canal du Midi, pour couper les plantes aquatiques qui gênent la Navigation.*

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/lesag_naveg_fr_02_1805
(último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1807. *Mémoire sur un nouveau système de navigation intérieure.*

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_memoi_fr_01_1807
(último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1808a. *Proposition pour établir une nouvelle machine pour creuser le canal et le Port de Veneise.*

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/betan_propo_fr_01_1807-LiSe
(último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1808b. *Explication d'une machine destinée à curer les ports de mer.*

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_expli_fr_01_1808
(último acceso: 01/05/2018)

Betancourt y Molina, A. 1830. Plan general del proyecto executado y por executar de los Canales de Castilla. Archivo Cartográfico del Ejército.

Bobylev, D. 2017. *Comparison of 3d modeling software.* Degree Thesis. Saimaa University of Applied Sciences (Finland). Disponible en:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132427/Denis_Bobylev_thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
(último acceso: 01/05/2018)

Bogoliúbov, A.N. 1969. *Agustín de Betancourt.* Ciencia: Moscú, 152 pp.

Bogoliúbov, A.N. 1973. *Agustín de Betancourt: un héroe español del progreso.* Seminarios y Ediciones: Madrid, 188 pp.

Bogoliúbov, A.N. 1986a. Agustín de Betancourt como arquitecto y urbanista. *LLull*, 9, 35-54.

Bogoliúbov, A.N. 1986b. Agustín de Betancourt como pedagogo. *Revista de obras públicas*, Septiembre, 703-718.

Cioranescu, A. 1965. *Agustín de Betancourt: su obra técnica y científica.* Instituto de Estudios Canarios: La Laguna de Tenerife, 199 pp.

Cohn, D. 2010. *Evolution of Computer-Aided Design.*

Disponible en: <http://www.digitaleng.news/de/evolution-of-computer-aided-design>
(último acceso: 01/05/2018)

Egorova, O.V. 2007. Agustin Betancourt and his contribution to higher engineering education in Russia. In: *Proceedings of 12th International World Congress in Mechanism and Machine Science (Besançon (France), 17-2 June 2007).*

Egorova, O.V. 2009. The first steam machine in Cuba: Little-known pages of Agustín de Betancourt's work and life. In: *Proceedings of International Symposium on History of Machine and Mechanisms (Taiwan, 2008)*, pp. 165-174. DOI: 10.1007/978-1-4020-9485-9_12.

Environment Agency United Kingdom. Datos hidrográficos del río Severn.

Disponible online: <http://www.gaugemap.co.uk/#!/Detail/1/11154>

(último acceso: 01/05/2018)

García Diego, J.A. 1975. *Huellas de Agustín de Betancourt en los Archivos Breguet*. Patronato de la Casa de Colón: Madrid. Separata del Anuario de Estudios Atlánticos, 21, 177-221.

García Diego, J.A. 1988. Agustín de Betancourt como espía industrial: estudios sobre la historia de la ciencia y de la técnica. En: *IV Congreso de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas (Valladolid, 1986)*, pp. 105-125. Junta de Castilla y León (Consejería de Cultura y Bienestar Social): Valladolid.

Geiger, R. 1984. Planning the French Canals: The 'Becquey Plan' of 1820-1822. *Journal of Economic History*, 44(2), 329-339.

Gouzévitch D.; Gouzévitch I. 1993. Les contacts franco-russes dans le monde de l'enseignement supérieur technique et de l'art de l'ingénieur. *Cahiers du monde russe et soviétique*, 34(3), 345-367.

Gouzévitch D.; Gouzévitch I. 2002. El modelo de la comunicación profesional de los ingenieros a finales del siglo XVIII y principios del XIX. En: *Ciencia y Romanticismo*, pp. 303-327. Fundación Orotava de Historia de la Ciencia: Maspalomas.

Hernández Álvarez, L.; Albada Jelgersma, P.; Ruiz Jiménez, F.J.; Hyams, W.; Couteau, V. 2014. *3D Printing*. Disponible en:

<https://atos.net/content/dam/global/ascent-whitepapers/ascent-whitepaper-3d-printing.pdf>

(último acceso: 01/05/2018)

Lopez-Cajún, C.S.; Cuadrado-Iglesias, J.I.; Ceccarelli, M. 2004. Early modern activity on Theory of Machine and Mechanisms by Lanz and Betancourt before 1830. In: *Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Vols. 1-5 (Tianjin, China, 2004)*, pp. 939-943.

López Conde, J. E. 2016, *Impresoras 3D*. Disponible en:

http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf

(último acceso: 01/05/2018)

Martín Medina, A. 2006. *Agustín de Betancourt y Molina*. Dykinson: Madrid, 189 pp.

Martín Medina, A. 2008. Los secretos de 'La presión del vapor de agua' de Agustín de Betancourt, desvelados más de dos siglos después. Cabildo de Tenerife (Área de Presidencia): Santa Cruz de Tenerife, 87 pp.

Moreno Domínguez, J.M. 2014. *Diseño y reconstrucción virtual de la máquina de vapor de doble efecto de Agustín de Betancourt*. (Proyecto Fin de Carrera – director: Prof. Dr. D. Rafael Enrique Hidalgo Fernández). Universidad de Córdoba: Córdoba (CD-ROM).

Muñoz Bravo, J. 1987. Betancourt, Godoy y el Soto de Roma. *Revista de Obras Públicas (Madrid 1987)*, 134, (3261), 555-574.

Muñoz Bravo, J. 2008a. *Agustín de Betancourt (1758-1824) y los/as Ingenieros de Caminos*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: Murcia, 88 pp.

Muñoz Bravo, J. 2008b. *Biografía cronológica de Don Agustín de Betancourt y Molina en el 250 aniversario de su nacimiento*. Acciona Infraestructuras: Murcia, 323 pp.

Nava Grimón A, Betancourt y Molina A. Noticia de la Acequia Imperial o Canal Real de Aragón, 1783. Recogida en Canal Imperial de Aragón. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 1984.

Naveros Naveiras, R. 2011. *Agustín de Betancourt: un ingeniero canario universal*. Organismo Autónomo de Museos y Centros (Cabildo de Tenerife): Santa Cruz de Tenerife, 44 pp.

Noël, F.J.M. ; Carpentier, L.J.M. 1927. *Nouveau dictionnaire des origines, inventions et découvertes dans les arts, les sciences, la géographie, l'agriculture, le commerce*. Voz Écluse: Paris, p. 448-449.

Padrón Acosta, S. 1958. *El ingeniero Agustín de Béthencourt y Molina*. Instituto de Estudios Canarios: La Laguna de Tenerife, 50 pp.

Primo y Medina, M. A.; Péramos Mendoza, M. J. 1988. La expedición del Conde de Mopox y Jaruco y su arribada forzosa en Tenerife. En: *Coloquio de Historia Canario-Americana*, VI Tomo I, 1ª Parte, pp. 245-284. Cabildo de Gran Canaria.

Poncelet, J.V.; Coriolis GG. 1845. *Rapport et mémoire sur le nouveau système d'écluse à flotteur de Mr. Girard*. Bachelier : Paris, 6 pp.

Prony, G.R. 1807. Sur une nouvelle écluse, inventée par M. de Betancourt. *Bulletin des Sciences par la Société Philomathique de Paris*, 1, 38-43.

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/prony_nouve_fr_01_1807
(último acceso: 01/05/2018)

Prony, G.R. 1809. Notice sur la nouvelle écluse de M. de Betancourt. *Journal de l'École Polytechnique*, 8, 146-161.

Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/prony_notic_fr_01_1809
(último acceso: 01/05/2018)

Proust, J.L. 1791. Experiencias sobre el descrudar la seda sin xabon. *Anales del Real Laboratorio de Química de Segovia*, 1, 295-312.

Proyecto Digital Betancourt. Disponible en: <http://fundacionorotava.es/betancourt>
(último acceso: 01/05/2018)

Rumeu de Armas, A. 1968. Agustín de Betancourt, fundador de la Escuela de Caminos y Canales: nuevos datos biográficos. (Anuario de Estudios Atlánticos, 486 (13), año 1967). Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: Madrid, 59 pp.

Rumeu de Armas, A. 1980. *Ciencia y tecnología en la España Ilustrada: La Escuela de caminos y canales*. Turner: Madrid, 554 pp.

Rumeu de Armas, A. 1990. *El Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro: origen, fundación y vicisitudes: una empresa técnica de Agustín de Betancourt*. Castalia - Fundación Juanelo Turriano: Madrid, 245 pp.

Sáenz Ridruejo, F. 1978. Betancourt y el Canal Imperial. *Revista de Obras Públicas* CXXV, 211-215.

Sáenz Ridruejo, F. 1986. Las últimas disposiciones de Betancourt en España. *Anuario de Estudios Estadísticos* 32, 195-210.

Sáenz Ridruejo, F. 2016. Agustín de Betancourt, en España, Francia, Inglaterra y Rusia. En: *Libros, caminos y días: El viaje del ingeniero*. Fundación Juanelo Turriano: Madrid, pp. 95-123.

Shih, R.H. 2015. *Parametric modeling with Autodesk Inventor 2016*. SDC Publications: Mission (Kansas, USA), 594 pp.

Shilov, V.; Kitov, V.; Nazarov, Y. 2012. Optical telegraph in Russia: 1794-1854. In: *Proceedings of 3rd IEEE History of Electro-Technology Conference (HISTELCON) (Pavia, Italia, 2012)*, pp. 1-9. DOI: 10.1109/HISTELCON.2012.6487576.

Tredgold, T.E. 1831. *Tratado de las máquinas de vapor y de su aplicación a la navegación, minas, manufacturas etc.* Escrito en inglés y traducido al francés por F. N. Mellet, y al castellano por Gerónimo de la Escosura. 2 vols. Imprenta de D. León Amarita: Madrid.

Utrilla Navarro, L. 1993. Agustín de Bethencourt, primer aerostero español. *Revista de Obras Públicas* 140 (3320), 71-73.

Villar-Ribera, R.; Hernández-Abad, F.; Rojas-Sola, J.I.; Hernández-Díaz, D. 2011. Agustín de Betancourt's telegraph: Study and virtual reconstruction. *Mechanism and Machine Theory* 46(6), 820-830. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.01.008.

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO 1	
Figura 1.1. Retrato de Agustín de Betancourt y Molina por Francisco de Goya	22
Figura 1.2. Detalles de la maquinaria empleada en las minas de Almadén	22
Figura 1.3. Máquina de vapor de doble efecto	24
Figura 1.4. Máquina para cortar las cañas y otras plantas acuáticas	25
Figura 1.5. Telégrafo óptico	26
Figura 1.6. Proyecto para la feria de Nizhny Novgorod	30
Figura 1.7. Panorámica de Tbilisi	31
CAPÍTULO 2	
Figura 2.1. Plano original del molino de sílex	42
Figura 2.2. Manuscrito explicativo de las diferentes partes del molino de sílex	43
Figura 2.3. Menú 'Crear nuevo archivo'	44
Figura 2.4. Entorno de trabajo para el proceso de modelado 3D	44
Figura 2.5. Botón 'Iniciar boceto 2D'	45
Figura 2.6. Menú de Boceto	45
Figura 2.7. Pantalla de Boceto	45
Figura 2.8. Submenú 'Crear'	46
Figura 2.9. Menú flotante de la operación 'Extruir'	46
Figura 2.10. Submenú 'Operaciones de trabajo'	46
Figura 2.11. Submenú 'Modificar'	46
Figura 2.12. Cuadro de diálogo 'Agujero'	47
Figura 2.13. Submenú 'Patrón'	47
Figura 2.14. Ejemplo de patrón rectangular	47
Figura 2.15. Submenú 'Superficies'	48
Figura 2.16. Menú 'Crear nuevo archivo'. Ensamblaje.	48
Figura 2.17. Menú 'Ensamblar'	48
Figura 2.18. Submenú 'Componente'	48
Figura 2.19. Submenú 'Posición'	48
Figura 2.20. Submenú 'Relaciones'	49
Figura 2.21. Cuadro de diálogo 'Insertar unión'	49
Figura 2.22. Menú dinámico para editar el contacto entre piezas	49
Figura 2.23. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Ensamblaje'	50
Figura 2.24. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Movimiento'	50
Figura 2.25. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Transicional'	50
Figura 2.26. Cuadro de diálogo 'Añadir restricción'. Pestaña 'Conjunto de restricciones'	50
Figura 2.27. Submenú 'Simplificar'	51
Figura 2.28. Menú 'Diseño'	51
Figura 2.29. Cuadro de diálogo 'Generador de componentes de ejes de articulación'	51
Figura 2.30. Menú 'Crear nuevo archivo'. Dibujo	52
Figura 2.31. Cuadro de diálogo 'Editar hoja'	52
Figura 2.32. Formato A3 con cuadro de rotulación	52
Figura 2.33. Menú 'Crear'. Pestaña 'Insertar vistas'	53
Figura 2.34. Cuadro de diálogo 'Vista del dibujo'	53
Figura 2.35. Vistas de alzado y planta superior de una pieza	53
Figura 2.36. Vistas de la pieza con el estilo de visualización elegido	54
Figura 2.37. Submenú 'Cota'	54
Figura 2.38. Cuadro de diálogo 'Editar cota'. Pestaña 'Texto'	54
Figura 2.39. Cuadro de diálogo 'Editar cota'. Pestaña 'Precisión y tolerancia'	55
Figura 2.40. Pieza parcialmente acotada	55
Figura 2.41. Submenú 'Notas de operaciones'	55
Figura 2.42. Tipología de símbolos secundarios para la acotación (ejes y simetrías)	55
Figura 2.43. Pieza acotada completamente	56
Figura 2.44. Ejemplo de plano de detalle	56
Figura 2.45. Submenú 'Tabla'	56
Figura 2.46. Cuadro de diálogo 'Lista de piezas'	57
Figura 2.47. Botón para insertar las referencias numéricas a cada elemento	57
Figura 2.48. Cuadro de diálogo 'Referencia numérica automática'	57
Figura 2.49. Plano de conjunto de un ensamblaje con indicación de sus elementos y lista de marcas	58
Figura 2.50. Menú 'Crear nuevo archivo'. Presentación	58
Figura 2.51. Menú 'Crear'	59
Figura 2.52. Cuadro de diálogo 'Seleccionar ensamblaje'	59

Figura 2.53. Botón para mover los componentes automáticamente	59
Figura 2.54. Menú dinámico para la definición de la trayectoria y la distancia de cada componente	60
Figura 2.55. Perspectiva estallada con las piezas colocadas en su posición de montaje	60
Figura 2.56. Perspectiva estallada importada a un plano	61
Figura 2.57. Botón 'Inventor Studio'	61
Figura 2.58. Opción 'Crear cámara según vista'	61
Figura 2.59. Toma de imagen con definición de cámara	62
Figura 2.60. Submenú 'Escena'	62
Figura 2.61. Cuadro de diálogo 'Estilos de iluminación de Studio'	62
Figura 2.62. Cuadro de diálogo 'Luces locales'. Pestaña 'General'	63
Figura 2.63. Localización de los puntos de luz en el modelo	63
Figura 2.64. Cuadro de diálogo 'Luces locales'. Pestaña 'Iluminación'	63
Figura 2.65. Botón 'Renderizar imagen'	63
Figura 2.66. Cuadro de diálogo 'Renderizar la imagen'. Pestaña 'General'	64
Figura 2.67. Cuadro de diálogo 'Renderizar la imagen'. Pestaña 'Renderizador'	64
Figura 2.68. Proceso de renderización de la imagen	64
Figura 2.69. Menú 'Animar'	65
Figura 2.70. Cuadro de edición de la animación	65
Figura 2.71. Cuadro de diálogo 'Animar componentes'	65
Figura 2.72. Posición del componente a animar	66
Figura 2.73. Cuadro de diálogo 'Animar cámara'. Pestaña 'Animar'	66
Figura 2.74. Cuadro de diálogo 'Cámara'	67
Figura 2.75. Cuadro de diálogo 'Animar cámara'. Pestaña 'Plataforma giratoria'	67
Figura 2.76. Botón para grabar la animación	67
Figura 2.77. Cuadro de edición del video	68
Figura 2.78. Impresora AirWolf 3D HD	70
Figura 2.79. Impresora Stratasys Objet 30	70
Figura 2.80. Submenú 'Exportar' dentro del menú inicial de Autodesk Inventor Professional	72
Figura 2.81. Selección del tipo de archivo STL	72
Figura 2.82. Pantalla de inicio del software para la impresión 3D en la impresora AirWolf 3D HD	73
Figura 2.83. Opciones del cuadro de diálogo 'Abrir archivo' de la impresora AirWolf 3D HD	73
Figura 2.84. Localización de la pieza en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD	73
Figura 2.85. Cambio de escala de la pieza en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD	74
Figura 2.86. Orientación de la pieza en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD	74
Figura 2.87. Menú de configuración de la impresora AirWolf 3D HD	75
Figura 2.88. Vista de capas de la impresión 3D en el simulador de la impresora AirWolf 3D HD	75
Figura 2.89. Pantalla de inicio del software para la impresión 3D en la impresora Stratasys Objet 30	76
Figura 2.90. Ventana de transformación de un objeto en el simulador de la impresora Stratasys Objet 30	77
Figura 2.91. Vistas de impresión de las piezas en el simulador de la impresora Stratasys Objet 30	77
Figura 2.92. Ventana de impresión de la impresora Stratasys Objet 30	78
Figura 2.93. Menú 'Entornos'	79
Figura 2.94. Botón de Análisis de tensión	80
Figura 2.95. Submenú 'Administrar'	80
Figura 2.96. Cuadro de diálogo 'Crear nueva simulación'	80
Figura 2.97. Árbol de operaciones de la simulación	80
Figura 2.98. Árbol de operaciones mostrando los materiales asignados a los diferentes elementos	81
Figura 2.99. Botón 'Asignar'	82
Figura 2.100. Cuadro de diálogo 'Editor de materiales: Hierro, gris'	82
Figura 2.101. Cuadro de diálogo 'Editor de materiales: Madera (roble)'	83
Figura 2.102. Submenú 'Restricciones'	83
Figura 2.103. Árbol de operaciones mostrando las restricciones aplicadas	84
Figura 2.104. Submenú 'Cargas'	84
Figura 2.105. Cuadro de diálogo 'Editar fuerza'	84
Figura 2.106. Cuadro de diálogo 'Presión'	84
Figura 2.107. Cuadro de diálogo 'Carga de rodamientos'	85
Figura 2.108. Cuadro de diálogo 'Momento'	85
Figura 2.109. Cuadro de diálogo 'Editar gravedad'	85
Figura 2.110. Botón para representar las diferentes acciones	85
Figura 2.111. Modelo con las cargas representadas	86
Figura 2.112. Árbol de operaciones mostrando las diferentes cargas aplicadas al modelo	86
Figura 2.113. Submenú 'Contactos'	87
Figura 2.114. Cuadro de diálogo 'Contacto manual'	87
Figura 2.115. Ejemplo de contacto manual	87
Figura 2.116. Árbol de operaciones mostrando los contactos establecidos	87
Figura 2.117. Submenú 'Malla'	88
Figura 2.118. Cuadro de diálogo 'Configuración de malla'	88

Figura 2.119. Cuadro de diálogo ‘Control de malla local’	88
Figura 2.120. Vista de región a la que se ha cambiado la malla	89
Figura 2.121. Árbol de operaciones mostrando los controles de malla local	89
Figura 2.122. Botón ‘Simular’	89
Figura 2.123. Botón ‘Configuración de análisis de tensión’	89
Figura 2.124. Cuadro de diálogo ‘Configuración de análisis de tensión’. Pestaña ‘General’	90
Figura 2.125. Cuadro de diálogo ‘Configuración de análisis de tensión’. Pestaña ‘Solucionador’	90
Figura 2.126. Cuadro de diálogo ‘Configuración de análisis de tensión’. Pestaña ‘Creación de malla’	91
Figura 2.127. Cuadro de diálogo ‘Simular’	91
Figura 2.128. Árbol de operaciones mostrando los resultados obtenidos tras la simulación	92
Figura 2.129. Resultado del análisis de tensiones (Tensiones de Von Mises)	92
Figura 2.130. Submenú ‘Mostrar’	93
Figura 2.131. Cuadro de diálogo ‘Configuración de barra de colores’	93

CAPÍTULO 3

MÁQUINA EÓLICA PARA DESAGUAR TERRENOS PANTANOSOS

Figura 3.1. Perspectiva isométrica del modelo 3D	98
Figura 3.2. Plano de conjunto del modelo 3D	99
Figura 3.3. Perspectiva estallada del modelo 3D	99
Figura 3.4. Detalle del mecanismo rotor que produce el movimiento al conjunto	100
Figura 3.5. Detalle del mecanismo elevador que hace subir y bajar los cubos	100
Figura 3.6. Estructura bastidor	101
Figura 3.7. Detalle de base del carro y soporte de los tambores cilíndricos	102
Figura 3.8. Aspa del mecanismo rotor	102
Figura 3.9. Mecanismo rotor de la máquina eólica	103
Figura 3.10. Detalle del sistema regulador de llenado de las artesas	104
Figura 3.11. Vista de alzado del sistema regulador	104
Figura 3.12. Detalle del tornillo sinfín, coronas y tambores	105
Figura 3.13. Eje regulador	105
Figura 3.14. Imagen fotorrealista del ingenio ensamblado	106
Figura 3.15. Posición centrada (Izda.) y posición engranada (Dcha.)	108
Figura 3.16. Tipos de restricciones: fija (Izda.), rodadura (Dcha.) y sin fricción (Inferior)	110
Figura 3.17. Activación de contactos de forma manual	111
Figura 3.18. Fuerzas que inciden en el modelo 3D	111
Figura 3.19. Discretización obtenida tras el refinamiento de la malla en el apoyo del eje	114
Figura 3.20. Tensiones de von Mises en la posición centrada (Izda.) y en la posición engranada (Dcha.)	115
Figura 3.21. Detalle de la tensión de von Mises entre el tornillo sinfín y la corona dentada	115
Figura 3.22. Distribución de desplazamientos en las posiciones centrada (Izda.) y engranada (Dcha.)	117
Figura 3.23. Vista general de la impresión 3D	120
Figura 3.24. Detalle del mecanismo de elevación	120

MÁQUINA PARA CORTAR CAÑAS Y OTRAS PLANTAS ACUÁTICAS EN CANALES Y RÍOS NAVEGABLES

Figura 3.25. Perspectiva isométrica del modelo en 3D	122
Figura 3.26. Plano de conjunto del modelo 3D: cuchilla simple (arriba) y cuchilla doble (abajo)	123
Figura 3.27. Perspectiva estallada del modelo 3D: cuchilla simple (arriba) y cuchilla doble (abajo)	124
Figura 3.28. Posiciones extremas de la máquina cortadora	126
Figura 3.29. Vista de detalle del espejo de popa	127
Figura 3.30. Perspectiva axonométrica de la sección longitudinal de la barcaza	127
Figura 3.31. Detalle del eje vertical pivotante: vista lateral (Izda.) y perspectiva axonométrica (Dcha.)	128
Figura 3.32. Detalle del engranaje entre el tornillo sinfín y el engranaje a un cuarto	128
Figura 3.33. Perspectiva axonométrica del mecanismo de corte de doble cuchilla	129
Figura 3.34. Detalle del mecanismo de manivela con los dos engranajes troncocónicos	130
Figura 3.35. Perspectiva axonométrica del mecanismo de corte simple	130
Figura 3.36. Frames de la máquina con sus distintos cabezales	131
Figura 3.37. Posiciones de trabajo del mecanismo: óptima (Izda. y Centro) y en desequilibrio (Dcha.)	135
Figura 3.38. Restricciones completas de movimiento: partes fijas	135
Figura 3.39. Restricciones de movimiento parcial: rodadura libre	136
Figura 3.40. Apoyos rotatorios aplicados	136
Figura 3.41. Fuerzas aplicadas sobre el modelo 3D en sus dos posiciones extremas	137
Figura 3.42. Momentos aplicados sobre el modelo 3D en sus dos posiciones extremas	138
Figura 3.43. Mallado automático del modelo 3D en sus dos posiciones extremas	138
Figura 3.44. Detalle del mallado refinado en la parte superior del modelo 3D	139
Figura 3.45. Distribución de tensiones de von Mises en sus dos posiciones extremas	139
Figura 3.46. Valores máximos de la tensión de von Mises en la posición con inclinación máxima	140
Figura 3.47. Valores máximos de la tensión de von Mises en la posición centrada.	140
Figura 3.48. Tensión de von Mises entre los engranajes troncocónicos con el eje inclinado	141

Figura 3.49. Distribución de desplazamientos en sus dos posiciones extremas	141
Figura 3.50. Distribución de deformaciones equivalentes en sus dos posiciones extremas	142
Figura 3.51. Coeficientes de seguridad en sus dos posiciones extremas	142
Figura 3.52 Vista general de la impresión 3D	144
Figura 3.53 Detalle de los engranajes	145

MOLINO DE ACCIONAMIENTO HIDRÁULICO PARA LA MOLIENDA DEL SILEX

Figura 3.54. Perspectiva isométrica del modelo 3D	148
Figura 3.55. Perspectiva estallada del modelo 3D	149
Figura 3.56. Plano de conjunto del modelo 3D	149
Figura 3.57. Posiciones límite: mecanismo extendido (Izda.) y mecanismo agrupado (Dcha.)	150
Figura 3.58. Vista de perfil de la rueda hidráulica	151
Figura 3.59. Alzado de la rueda hidráulica	151
Figura 3.60. Perspectiva axonométrica de la rueda hidráulica	152
Figura 3.61. Perspectiva axonométrica de la campana y su collar asociado	152
Figura 3.62. Perspectiva axonométrica de la rueda dentada cónica	153
Figura 3.63. Collares de la bancada exterior en su posición (Izda.) y detalle del rodamiento (Dcha.)	153
Figura 3.64. Collares sin carcasa exterior (Izda.) y detalle de los rodamientos (Dcha.)	154
Figura 3.65. Perspectiva axonométrica de la rueda dentada cónica fijada por los collares	154
Figura 3.66. Perspectiva axonométrica de la estructura de molturación	155
Figura 3.67. Perspectiva axonométrica del eje vertical con sus engranajes	156
Figura 3.68. Vista en planta de los engranajes rectos	156
Figura 3.69. Perspectiva axonométrica de las piedras de moler con su eje propio	157
Figura 3.70. Vista de la fábrica de ladrillo soporte del mecanismo	158
Figura 3.71. Imagen fotorrealista del ingenio ensamblado	158
Figura 3.72. Restricción fija (bancada izda.), bidireccional (bancada dcha.) y articulada (rodamientos)	162
Figura 3.73. Disposición de las palas en la rueda hidráulica	164
Figura 3.74. Fuerzas aplicadas en ambas palas	164
Figura 3.75. Aplicación del vector de la gravedad en el mecanismo según las dos posiciones límite	165
Figura 3.76. Aplicación del peso del árbol vertical de transmisión en el centro de la bancada interior	165
Figura 3.77. Discretización automática proporcionada por el software	166
Figura 3.78. Discretización obtenida tras el refinamiento de la malla	166
Figura 3.79. Discretización final	167
Figura 3.80. Tensiones de von Mises (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado)	167
Figura 3.81. Tensiones de von Mises en el apoyo del eje horizontal (Izda.: extendido – Dcha.: agrupado)	168
Figura 3.82. Tensiones de von Mises en los rodamientos del soporte (Izda.: extendido – Dcha.: agrupado)	168
Figura 3.83. Coeficientes de seguridad (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado)	169
Figura 3.84. Distribución de deformaciones (Izda.: mecanismo extendido – Dcha.: mecanismo agrupado)	169
Figura 3.85. Distribución de desplazamientos (Izda.: mecanismo extendido–Dcha.: mecanismo agrupado)	170
Figura 3.86. Vista general de la impresión 3D	172
Figura 3.87. Detalle del bastidor fijo y engranajes	173

ESCLUSA DE ÉMBOLO BUZO

Figura 3.88. Vistas principales de la esclusa de émbolo buzo	177
Figura 3.89. Vista de la máquina para subir o bajar barcos de Coalbrookdale	177
Figura 3.90. Vista de detalle de la misma máquina accionada por el émbolo buzo de Betancourt	178
Figura 3.91. Detalles de distintas piezas del mecanismo	178
Figura 3.92. Perspectiva isométrica del modelo 3D	179
Figura 3.93. Perspectiva estallada del modelo 3D	180
Figura 3.94. Plano de conjunto del modelo 3D	180
Figura 3.95. Posiciones límite: buzo sumergido (Izda.) y buzo elevado (Dcha.)	182
Figura 3.96. Corte longitudinal del canal donde se aprecian detalles de la fábrica de ladrillo	182
Figura 3.97. Vista en planta del canal y de la fábrica de ladrillo	183
Figura 3.98. Corte transversal de la fábrica de ladrillo donde se aprecia foso, canal y su comunicación	183
Figura 3.99. Alzado de la compuerta superior	184
Figura 3.100. Perspectiva axonométrica de la compuerta en su emplazamiento	184
Figura 3.101. Perspectiva axonométrica de la compuerta inferior	185
Figura 3.102. Perspectiva axonométrica de la compuerta inferior cerrada	185
Figura 3.103. Perspectiva axonométrica del sistema de maniobra del contrapeso	186
Figura 3.104. Vista lateral de la viga puente con la polea atornillada	186
Figura 3.105. Perspectiva axonométrica de la viga puente y las poleas	187
Figura 3.106. Vista lateral del sistema de engranajes y la viga puente	187
Figura 3.107. Vista lateral del eje del contrapeso con su engranaje a un cuarto	188
Figura 3.108. Perspectiva axonométrica del eje del contrapeso en su entorno	188
Figura 3.109. Perspectiva axonométrica del sistema contrapeso	188
Figura 3.110. Vista lateral del conjunto contrapeso y buzo en su posición sumergida	189

Figura 3.111. Vista lateral de los contrapesos de madera y los brazos metálicos	189
Figura 3.112. Perspectiva axonométrica de un eslabón (Izda.) y definición de contactos (Dcha.)	190
Figura 3.113. Perspectiva axonométrica de dos eslabones	190
Figura 3.114. Vista lateral de la cadena sobre la polea	191
Figura 3.115. Perspectiva axonométrica del templador de doble gancho	191
Figura 3.116. Vista lateral del sistema de conexión entre contrapeso y buzo	192
Figura 3.117. Perspectiva axonométrica seccionada de la conexión entre contrapeso y buzo	192
Figura 3.118. Perspectiva axonométrica de la cadena en su posición levantada	192
Figura 3.119. Posición centrada (Izda.) y posición engranada (Dcha.)	196
Figura 3.120. Restricciones: Fija y atornillada (Superior) y rodadura y de contacto manual (Inferior)	198
Figura 3.121. Fuerza gravitatoria (Izda.) y de presión uniforme en el fondo del émbolo buzo (Dcha.)	199
Figura 3.122. Discretización automática proporcionada por el software	200
Figura 3.123. Discretización obtenida tras el refinamiento de los eslabones de la cadena	201
Figura 3.124. Tensiones de von Mises del émbolo buzo en su posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.)	202
Figura 3.125. Detalle de la tensión de von Mises en el eslabón	202
Figura 3.126. Zonas con tensiones de von Mises elevadas	203
Figura 3.127. Coeficiente de seguridad del émbolo buzo en la posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.)	204
Figura 3.128. Deformaciones del émbolo buzo en la posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.)	205
Figura 3.129. Desplazamientos del émbolo buzo en la posición más baja (Izda.) y más alta (Dcha.)	206
Figura 3.130. Vista general de la impresión 3D	209
Figura 3.131. Detalle de la parte posterior	209
Figura 3.132. Detalle de las cadenas	210

DRAGA MECÁNICA DEL PUERTO DE KRONSTADT

Figura 3.133. Perspectiva isométrica renderizada del modelo 3D completo	213
Figura 3.134. Perspectiva isométrica simplificada para apreciar la draga y las cucharas	213
Figura 3.135. Plano de conjunto del sistema de la draga	214
Figura 3.136. Plano de conjunto del sistema de cuchara	214
Figura 3.137. Plano de conjunto del sistema de maniobra y elevación de la draga	215
Figura 3.138. Perspectiva estallada del modelo 3D	215
Figura 3.139. Secuencia de movimientos de la draga al moverse el pistón	216
Figura 3.140. Perspectiva axonométrica con palanca de trabajo levantada en posición de trabajo	218
Figura 3.141. Perspectiva axonométrica con palanca de frenado levantada en posición de detención	218
Figura 3.142. Perspectiva axonométrica con ambas palancas levantadas para ralentizar el movimiento	219
Figura 3.143. Perspectiva axonométrica del barco	219
Figura 3.144. Perspectiva axonométrica con los elementos impulsores del sistema de draga	220
Figura 3.145. Perspectiva axonométrica del soporte de los balancines	220
Figura 3.146. Perspectiva axonométrica del apoyo del eje del balancín	221
Figura 3.147. Perspectiva axonométrica del balancín principal	221
Figura 3.148. Perspectiva axonométrica del balancín secundario	221
Figura 3.149. Perspectiva axonométrica de la unión entre balancines y el eje del pistón del cilindro	222
Figura 3.150. Perspectiva axonométrica de la biela	222
Figura 3.151. Perspectiva axonométrica del cigüeñal	223
Figura 3.152. Perspectiva axonométrica del apoyo	223
Figura 3.153. Perspectiva axonométrica del soporte de la transmisión de la draga	224
Figura 3.154. Vista lateral del soporte de la transmisión: secuencia de montaje	224
Figura 3.155. Vista de alzado del soporte de la transmisión: secuencia de montaje	224
Figura 3.156. Perspectiva axonométrica del eje principal	225
Figura 3.157. Perspectiva axonométrica del eje de la draga	225
Figura 3.158. Perspectiva axonométrica del eje de fricción	226
Figura 3.159. Perspectiva axonométrica del eje auxiliar 1	226
Figura 3.160. Perspectiva axonométrica del eje auxiliar 2	227
Figura 3.161. Perspectiva axonométrica de la corona externa y de un apoyo tipo	227
Figura 3.162. Perspectiva axonométrica del carril	227
Figura 3.163. Perspectiva axonométrica de las ruedas y del eje	228
Figura 3.164. Perspectiva axonométrica del piñón inferior	228
Figura 3.165. Perspectiva axonométrica de un par de eslabones (macho inferior y hembra superior)	229
Figura 3.166. Perspectiva axonométrica del instrumental de draga (cangilón y gancho)	229
Figura 3.167. Perspectiva axonométrica del bastidor o soporte del sistema de cuchara	230
Figura 3.168. Vista de alzado del soporte de la cuchara: secuencia de montaje	230
Figura 3.169. Vista de perfil del soporte de la cuchara: secuencia de montaje	230
Figura 3.170. Perspectiva axonométrica del rodillo de acción de la polea	231
Figura 3.171. Perspectiva axonométrica del tambor de recogida de la cuerda de posicionamiento	231
Figura 3.172. Perspectiva axonométrica de la unión entre bastidor y el gancho de la polea	231
Figura 3.173. Perspectiva axonométrica del soporte metálico de la polea superior	232
Figura 3.174. Perspectiva estallada de la polea	232

Figura 3.175. Perspectiva axonométrica del soporte metálico de la polea inferior	233
Figura 3.176. Perspectiva axonométrica de la viga soporte de la cuchara	233
Figura 3.177. Perspectiva axonométrica de la pieza metálica para la flexión y extensión de la cuchara	234
Figura 3.178. Perspectiva axonométrica de cada cuchara	234
Figura 3.179. Perspectiva axonométrica de la base de popa para el apoyo de los cojinetes interiores	235
Figura 3.180. Perspectiva axonométrica del cojinete	235
Figura 3.181. Perspectiva axonométrica del eje para la elevación de la draga	235
Figura 3.182. Perspectiva axonométrica de las argollas de elevación de la draga con su cuerda	236
Figura 3.183. Perspectiva axonométrica de la barra de maniobra	236
Figura 3.184. Perspectiva axonométrica de un rodillo	236
Figura 3.185. Perspectiva axonométrica del ensamblaje de balancines, eje del cilindro y biela	238
Figura 3.186. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema transmisor	240
Figura 3.187. Perspectiva axonométrica del ensamblaje de los elementos de la draga	241
Figura 3.188. Perspectiva axonométrica del ensamblaje de las cucharas con su viga soporte	242
Figura 3.189. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema cuchara	243
Figura 3.190. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema de elevación	244
Figura 3.191. Perspectiva axonométrica del ensamblaje del sistema de maniobra	245
Figura 3.192. Perspectiva axonométrica del sistema simplificado de la draga tras el preprocesado	246
Figura 3.193. Restricciones fijas: base de los soportes (Izda.) y superficie del eslabón (Dcha.)	247
Figura 3.194. Articulaciones	247
Figura 3.195. Contactos manuales entre los tambores de fricción y los rodamientos de apoyo	248
Figura 3.196. Contactos manuales entre el eslabón y la superficie del piñón	248
Figura 3.197. Fuerza de la gravedad representada en el centro de gravedad del mecanismo	249
Figura 3.198. Fuerzas aplicadas en los cangilones (presión ejercida por la masa de arena)	249
Figura 3.199. Fuerza ejercida por la máquina de vapor sobre el pistón	251
Figura 3.200. Discretización automática obtenida	252
Figura 3.201. Cangilón de la draga en la que se aprecia una densidad de malla muy alta	252
Figura 3.202. Distribución de tensiones de von Mises	253
Figura 3.203. Tensión de von Mises máxima alcanzada en un eslabón del rosario de cangilones	254
Figura 3.204. Tensión de von Mises en el eje del balancín de la draga	255
Figura 3.205. Elemento con el coeficiente de seguridad más bajo	256
Figura 3.206. Elemento con el segundo coeficiente de seguridad más bajo	256
Figura 3.207. Detalle del contacto entre el tambor de fricción y el tambor de rodamiento	257
Figura 3.208. Distribución de deformaciones equivalentes	257
Figura 3.209. Punto donde se localiza la deformación máxima	258
Figura 3.210. Distribución de desplazamientos	258
Figura 3.211. Punto con el desplazamiento máximo	259
Figura 3.212. Vista general de la impresión 3D	260
Figura 3.213. Detalle del rosario de la draga	261
Figura 3.214. Detalle de la posición de los ejes en los bastidores	262

ANEXOS

ANEXO 1**Publicaciones derivadas de la tesis doctoral****ARTÍCULOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS INTERNACIONALES**

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2019. Agustín de Betancourt's plunger lock: Analysis of its construction through computer-aided engineering. *Informes de la Construcción*, 71(553), aceptada para publicación. DOI: 10.3989/id.61041.

(Indexada en Journal Citation Reports - Science Edition) (Clarivate Analytics)

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2018. La máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos de Agustín de Betancourt y Molina: análisis de su construcción mediante ingeniería asistida por ordenador. *Informes de la Construcción*, 70(549): e236. DOI: 10.3989/id.54738.

(Indexada en Journal Citation Reports - Science Edition) (Clarivate Analytics)

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2018. El molino para la molienda de sílex de Agustín de Betancourt y Molina: Análisis mediante ingeniería asistida por ordenador. *Dyna*, 93(2): 165-169. DOI: 10.6036/8218.

(Indexada en Journal Citation Reports - Science Edition) (Clarivate Analytics)

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2018. Digital 3D reconstruction of Betancourt's historical heritage: the dredging machine in the Port of Kronstadt. *Virtual Archaeology Review*, 9(18): 44-56. DOI: 10.4995/var.2018.7946.

(Indexada en Emerging Sources Citation Index – ESCI) (Clarivate Analytics)

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2018. The machine for cutting cane and other aquatic plants in navigable waterways by Agustín de Betancourt: Approach to its geometric modeling with Autodesk Inventor Professional. *Technologies*, 6(1) artículo 23. DOI: 10.3390/technologies6010023.

(Indexada en Emerging Sources Citation Index – ESCI) (Clarivate Analytics)

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2017. Agustín de Betancourt's wind machine for draining marshy ground: Approach to its geometric modeling with Autodesk Inventor Professional. *Technologies*, 5(1) artículo 2. DOI: 10.3390/technologies5010002.

(Indexada en Emerging Sources Citation Index – ESCI) (Clarivate Analytics)

CAPÍTULO DE LIBRO EN EDITORIAL INTERNACIONAL

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2017. The machine for cutting cane and other aquatic plants in navigable waterways by Agustín de Betancourt y Molina: Analysis by computer-aided engineering techniques with Autodesk Inventor Professional. Ed. Seifedine Kadry. In: *Mechanical Systems: Research, Applications and Technology*, pp. 53-71. Nova Science Publishers, Inc. USA. ISBN: 978-1-53612-370-8.

(Indexado en Scopus)

COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2017. Agustín de Betancourt's plunger lock: Approach to its geometric modeling with Autodesk Inventor Professional. In: *Proceeding of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing* (Catania, Italia, 14-16 septiembre 2016), pp. 757-765. DOI: 10.1007/978-3-319-45781-9_76. ISBN: 978-3-319-45780-2.

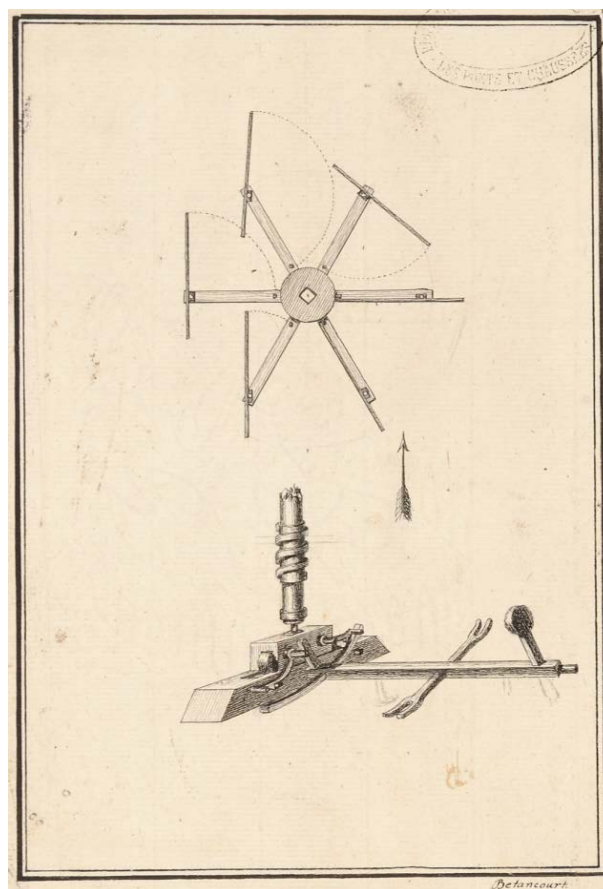
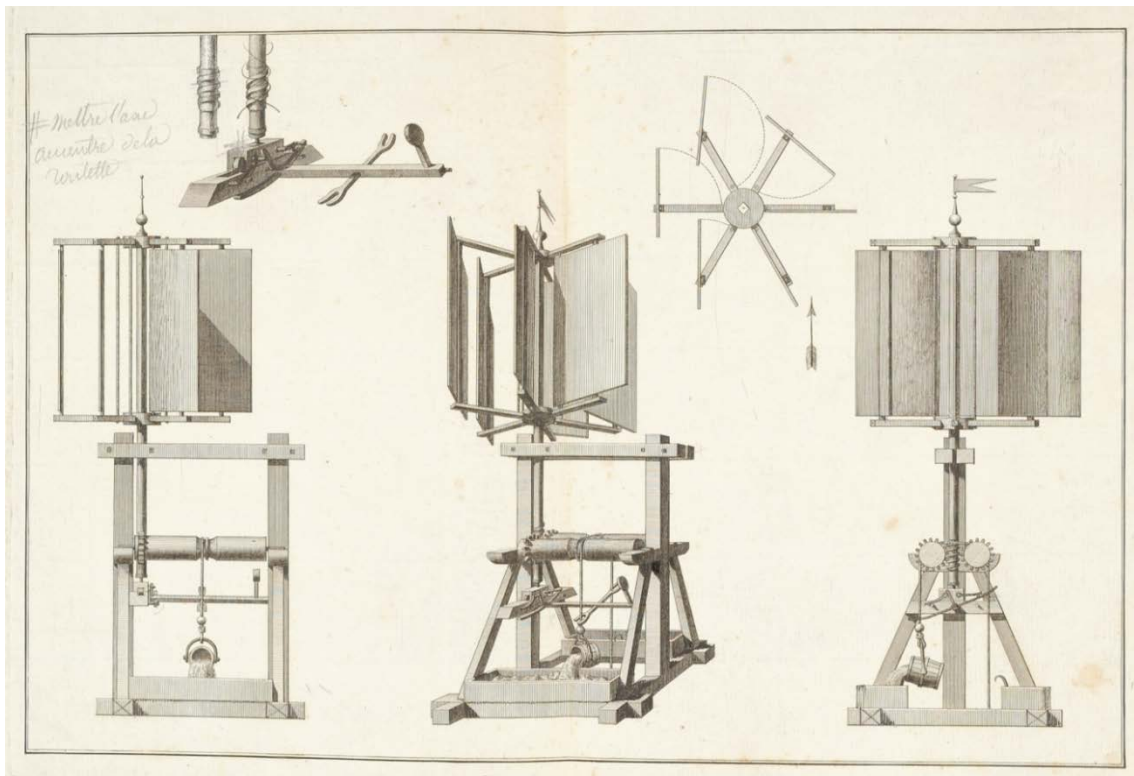
(Actas publicadas en la colección 'Lecture Notes' de la Editorial Springer titulada 'Advances in Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing'.

(Indexada en Conference Proceedings Citation Index – Science (CPCI-S) (Clarivate Analytics) y Scopus).

Rojas-Sola, J.I.; De la Morena-de la Fuente, E. 2016. El molino para la molienda del sílex de Agustín de Betancourt y Molina: Aproximación a su modelado geométrico con Autodesk Inventor Professional. En: *I Congreso Internacional de Patrimonio Industrial y de la Obra Pública* (Huelva, España, 26-28 de octubre de 2016), pp. 353-361. ISBN: 978-84-617-5659-9.

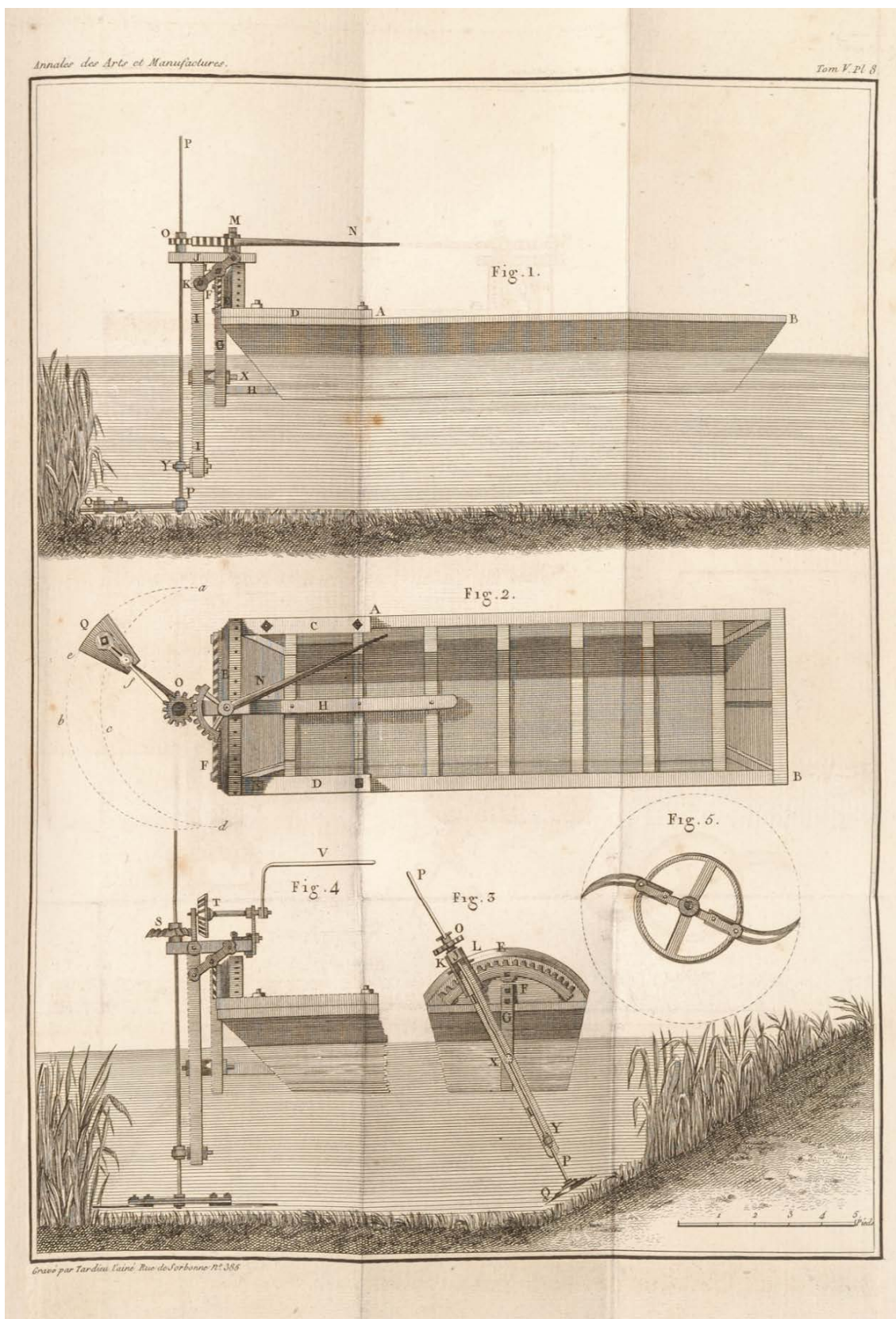
ANEXO 2

Planimetría de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos



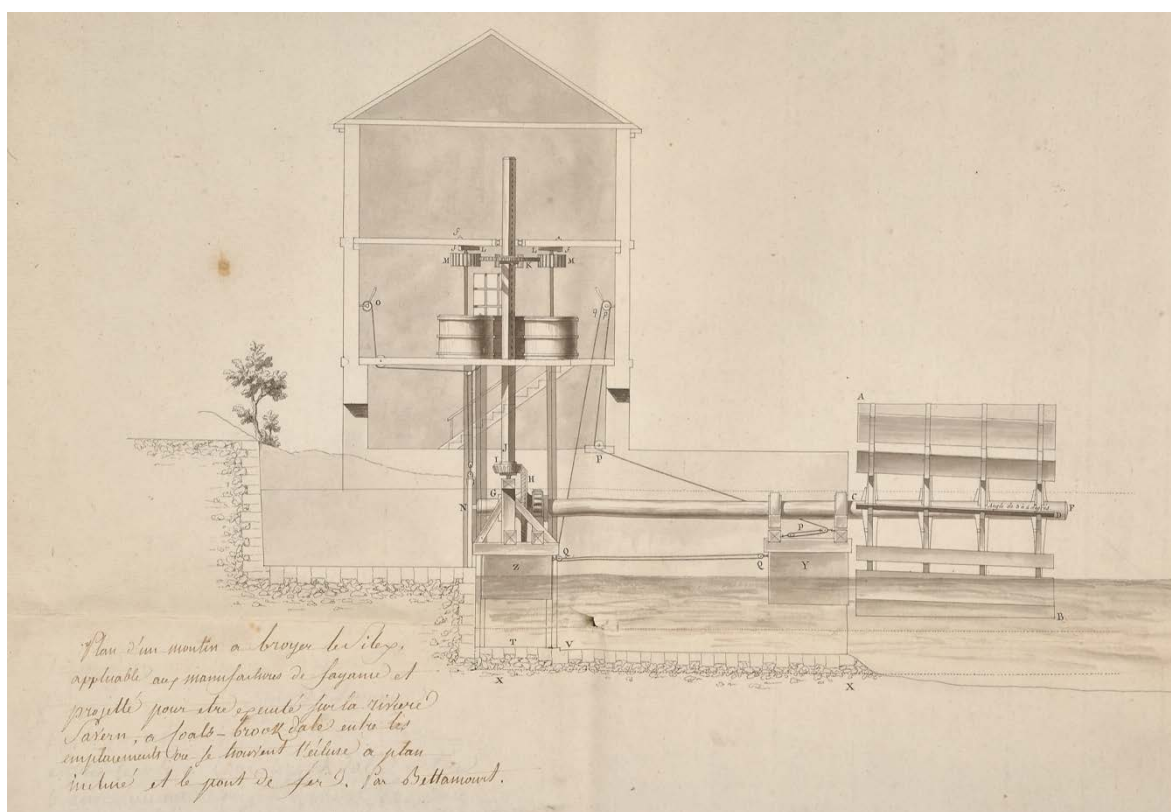
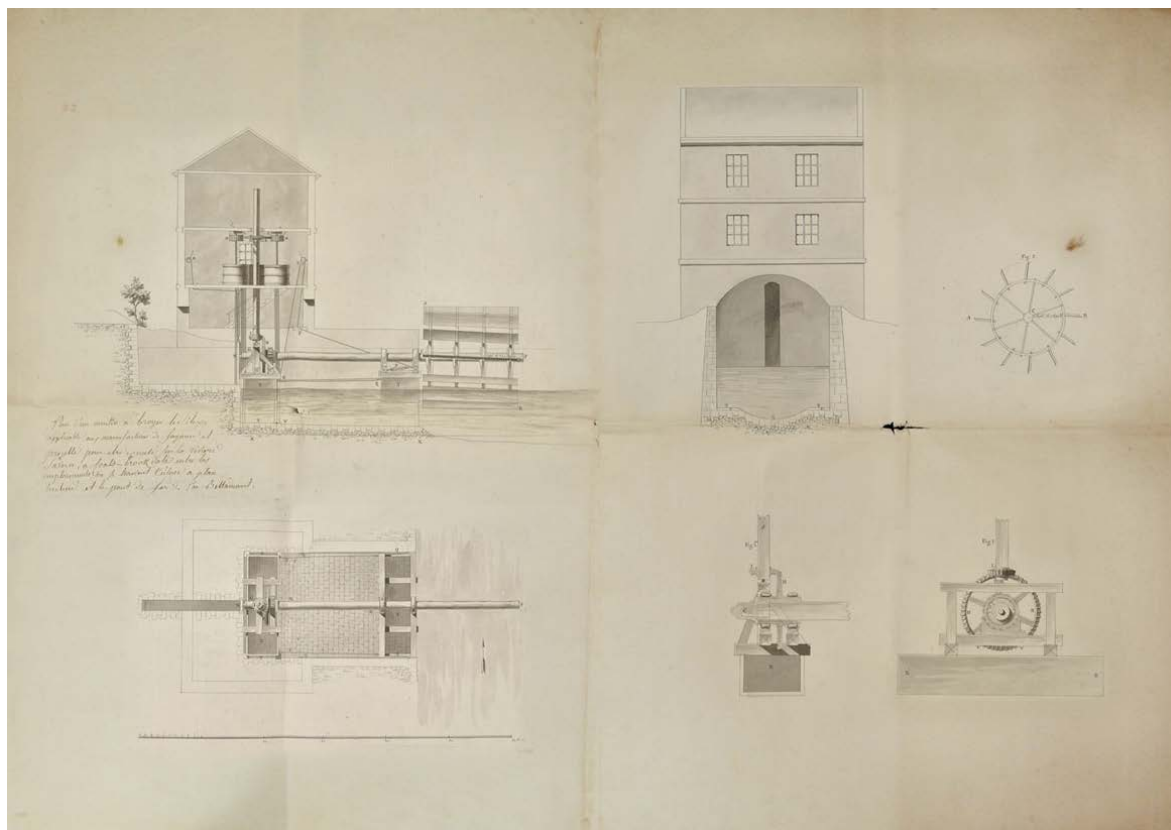
ANEXO 3

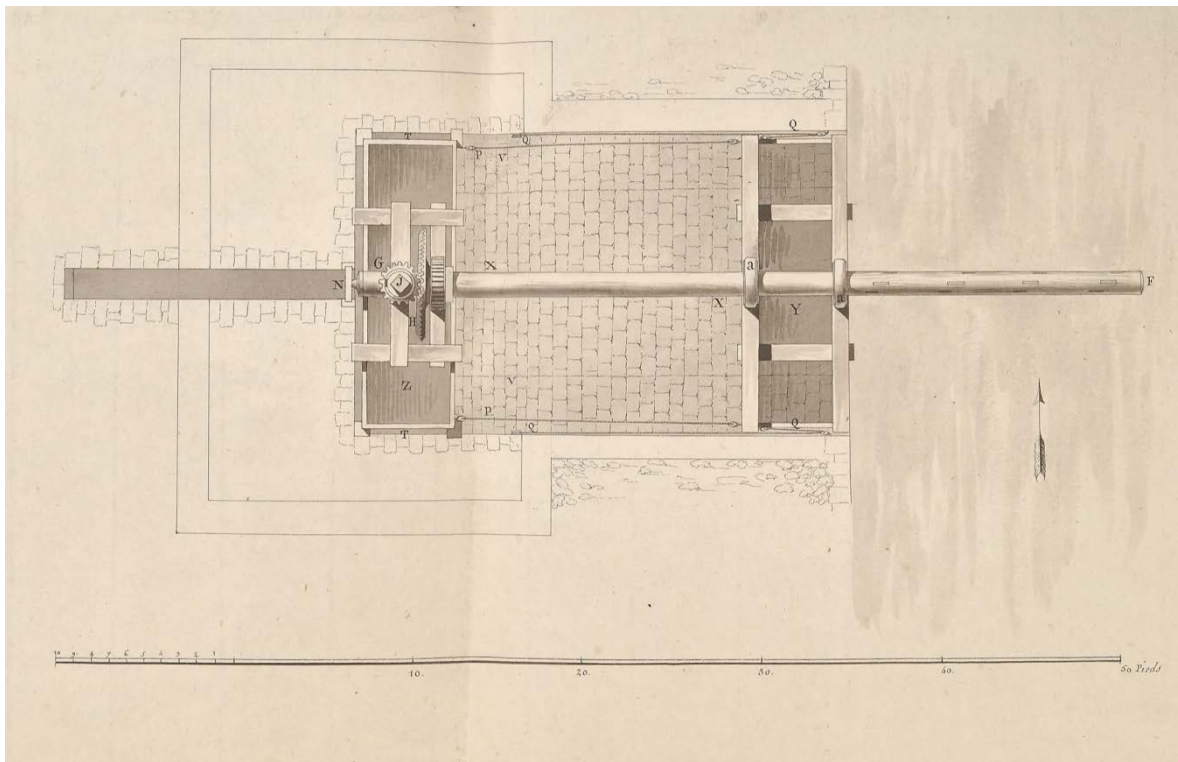
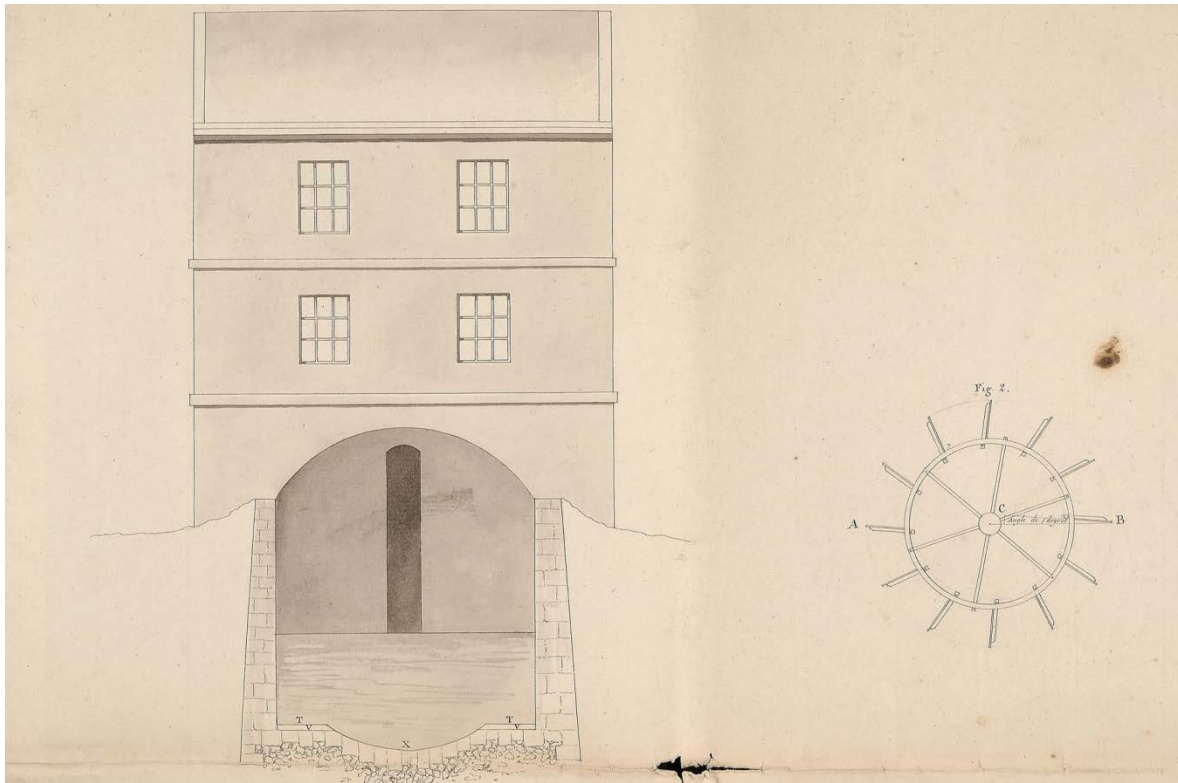
Planimetría de la máquina para cortar cañas y otras plantas acuáticas

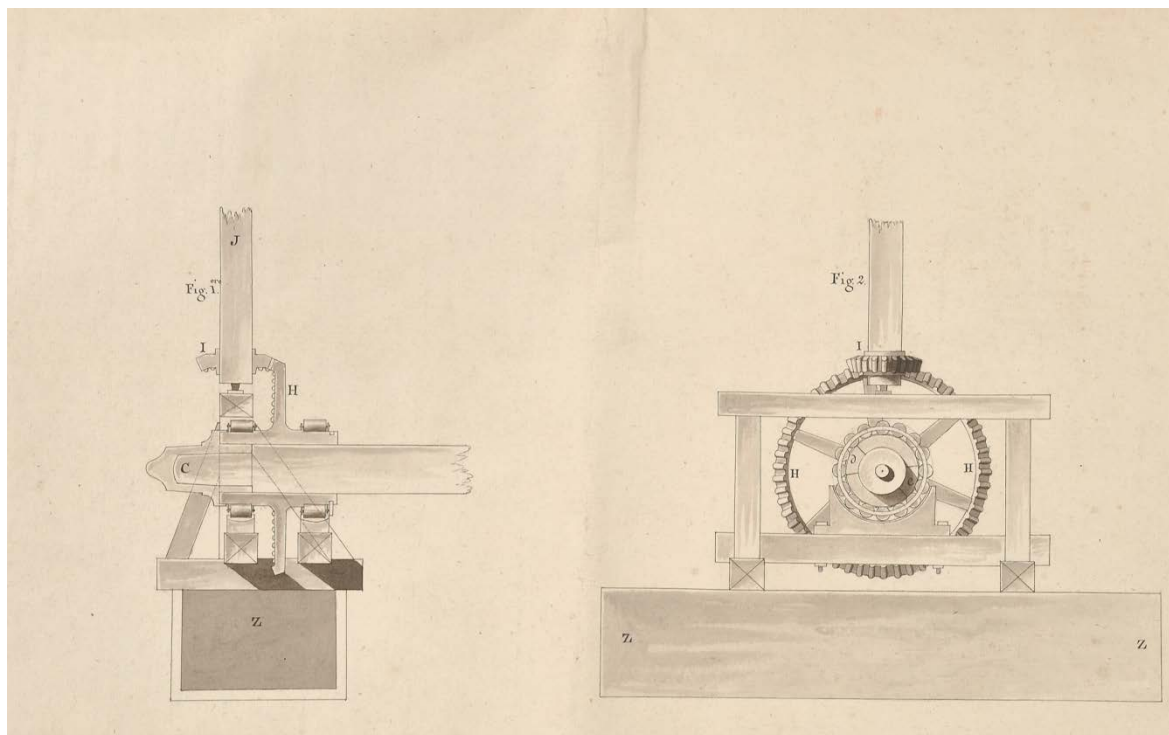


ANEXO 4

Planimetría del molino hidráulico para la molienda del sílex

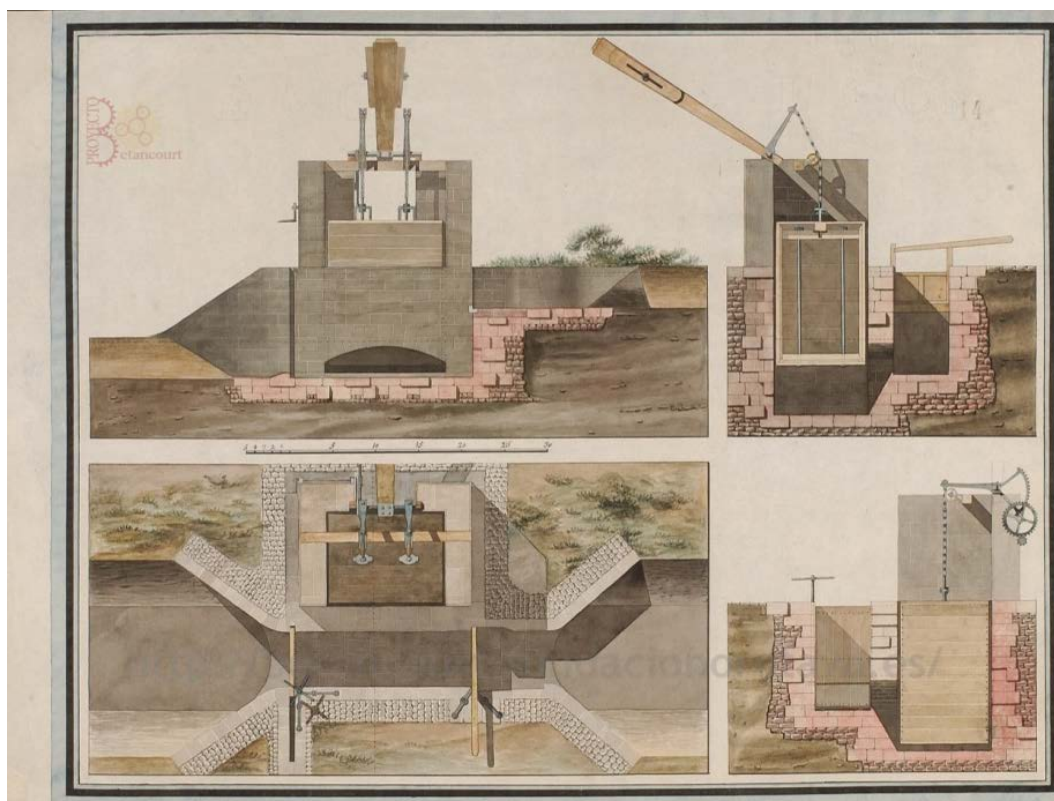
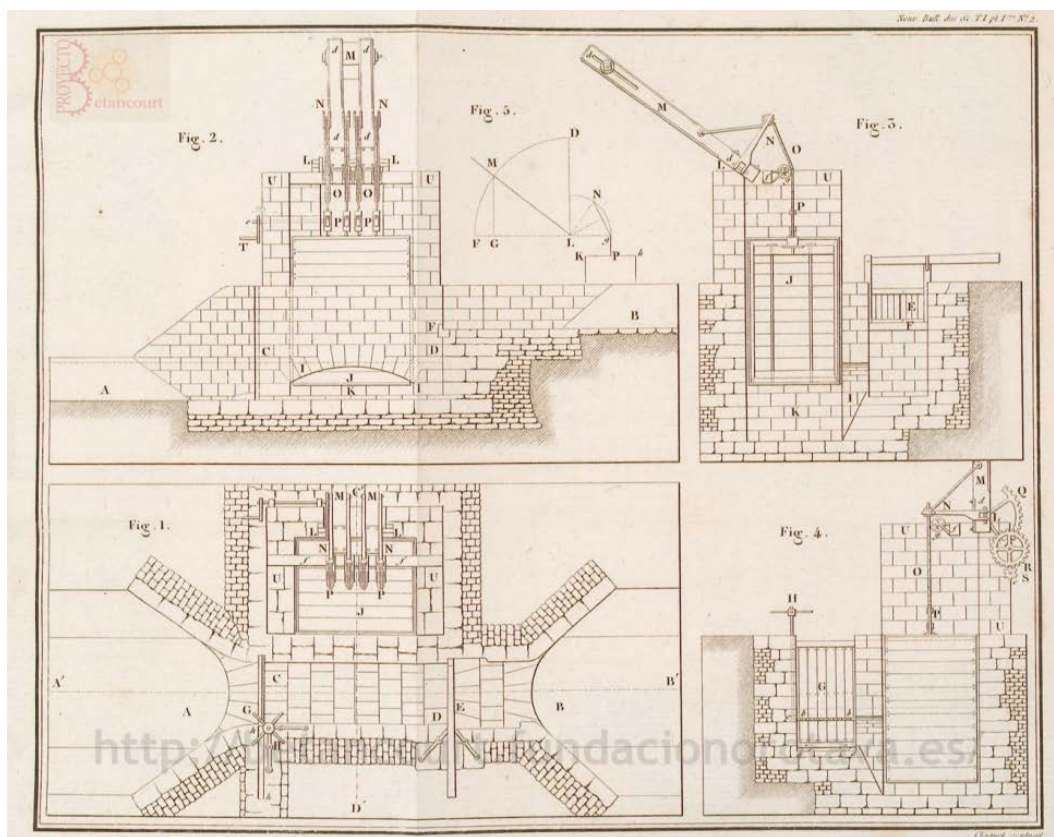






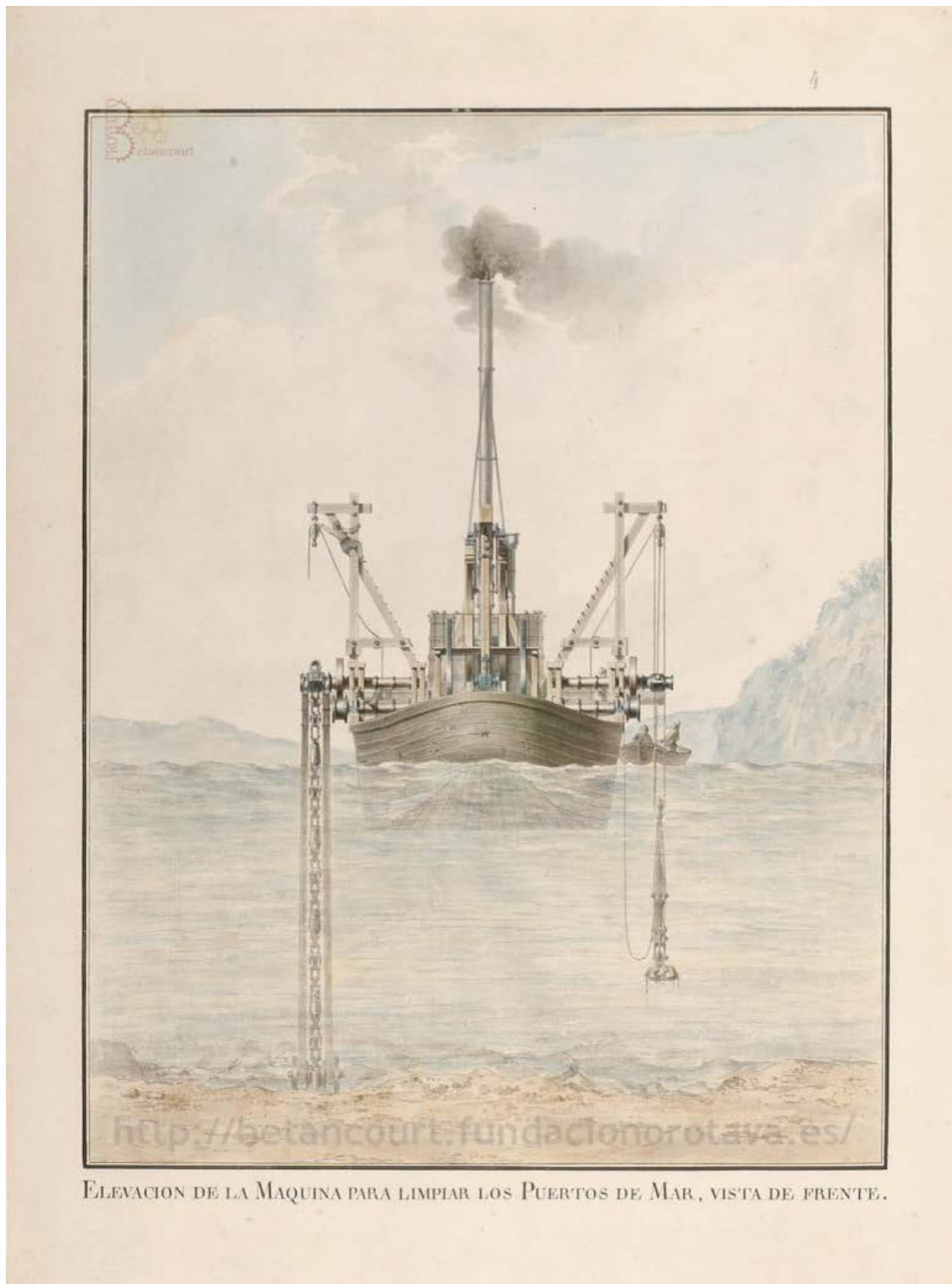
ANEXO 5

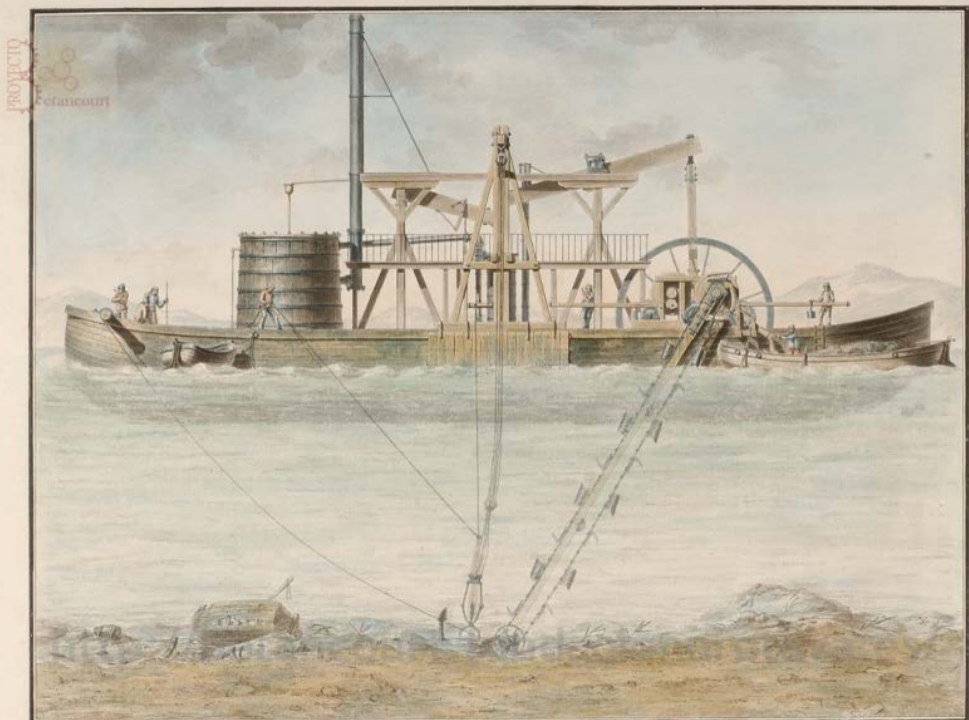
Planimetría de la esclusa de émbolo buzo



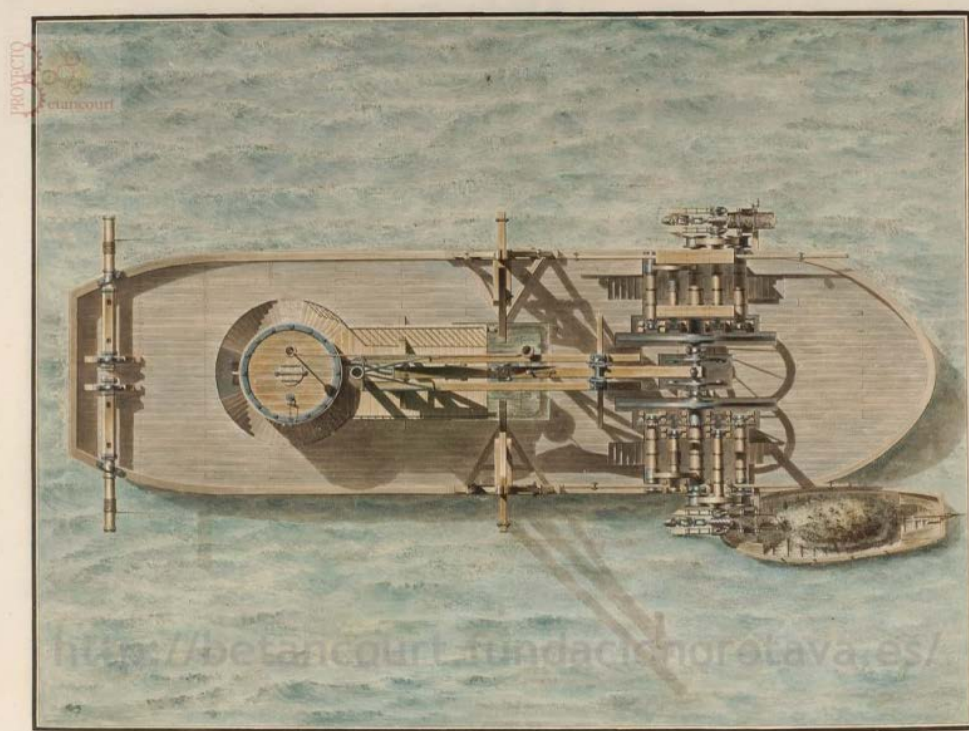
ANEXO 6

Planimetría de la draga mecánica del puerto de Kronstadt





ELEVACION DE LA MAQUINA PARA LIMPIAR LOS PUERTOS DE MAR, VISTA DE LADO.



PLAN DE UNA MAQUINA PARA LIMPIAR LOS PUERTOS DE MAR, MOVIDA POR MEDIO DEL VAPOR DEL AGUA.

